

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Završni rad

Preinaka lakog dostavnog vozila u električno vozilo

Leon Kuzmić
0035184794

U Zagrebu, rujan 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studiranja i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Zoranu Luliću na pomoći i smjernicama prilikom pisanja ovog rada.

Također, zahvaljujem doc. dr. sc. Goranu Šagiju na pomoći oko proračunskog dijela rada.

Sadržaj

Sadržaj	2
Popis oznaka s mjernim jedinicama	3
Popis slika	5
Popis tablica	6
1. Uvod	8
2. Pogonski koncepti	10
3. Proračun potpuno električnog vozila	11
3.1. Proračun izvornog Diesellovog motora OM611 za usporedbu rezultata.....	11
3.2. Proračun zahtjeva za elektromotor	18
3.3. Proračun elektromotora	23
3.4. Odabir elektromotora za potpuno električno vozilo	41
3.5. Proračun baterija za potpuno električno vozilo	46
3.6. Proračun litij-ionskih i litij-polimernih baterija.....	50
4. Financijska analiza preinake u potpuno električno vozilo.....	56
5. Zaključak	57
6. Literatura	58

Popis oznaka s mjernim jedinicama

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A	m^2	Čeona površina vozila
a	$\frac{m}{s^2}$	Ubrzanje vozila
C_w	-	Faktor otpora zraka
DoD	-	Faktor dubine pražnjenja baterija, engl. <i>Depth of discharge</i>
d_{kot}	m	Promjer kotača
E	Wh, J	Električna energija
e_{pokr}	$\frac{J}{km}$	Utrošena energija za pokretanje vozila po prijedenoj jedinici puta
e_{EV}	$\frac{Wh}{km}$	Specifična potrošnja energije po jedinici puta
F	N	Sila
F_a	N	Sila otpora ubrzavanja
f_k	-	Faktor otpora kotrljanja
F_R	N	Ukupni otpor vožnje
F_k	N	Sila otpora kotrljanja
F_z	N	Sila otpora zraka
F_v	N	Vučna sila
$F_{v,id}$	N	Idealna vučna sila
F_u	N	Sila otpora uspona
$G_{l,100 km,komb}$	$\frac{l}{100 km}$	Potrošnja dizelskog goriva po prijedenoj jedinici puta
$H_{d,diz}$	$\frac{J}{kg}$	Donja ogrjevna vrijednost dizelskog goriva
g	$\frac{m}{s^2}$	Gravitacijsko ubrzanje
i_{or}	-	Prijenosni omjer osovinskog reduktora
i_{UK}	-	Ukupni prijenosni omjer
$i_{m,i}$	-	Prijenosni omjer pojedinog stupnja reduktora
M_e	Nm	Efektivni moment motora
$M_{e,pot}$	Nm	Potreban efektivni moment motora
M_p	Nm	Pogonski moment na kotaču
m	kg	Masa
m_v	kg	Masa vozila
n	min^{-1}	Brzina vrtnje
P_e	kW	Efektivna snaga motora
$P_{e,pot}$	kW	Potrebna efektivna snaga motora
p_z	Pa	Tlak otpora zraka
P_k	kW	Snaga za savladavanje otpora kotrljanja

P_R	kW	Ukupna snaga za savladavanje otpora vožnje
r_{din}	m	Dinamički polumjer kotača
s	m	Put
s	%	Uspon
U	V	Napon
v	km/h	Brzina vozila
v_0	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina protuvjetra
α	°	Kut uspona
η_m	-	Mehanički stupanj korisnosti
η_{el}	-	Učinkovitost elektromotora
η_{dies}	-	Učinkovitost Diesellovog motora
Q	C	Električni naboj
ρ_z	kg/m ³	Gustoća zraka
ρ_{diz}	kg/m ³	Gustoća dizelskog goriva
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Kutna brzina

Popis slika

Slika 1.1. Vozilo Mercedes-Benz Sprinter 208 CDI [1]	8
Slika 3.1. Snaga i moment izvornog Dieselog motora OM 611	11
Slika 3.2. Vučna sila izvornog Dieselog motora OM 611 ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje	14
Slika 3.3. Ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa vozila koje je pogonjeno izvornim Dieselovim motorom	17
Slika 3.4. Brzina vozila ovisna o vremenu koje je pogonjeno izvornim Dieselovim motorom	17
Slika 3.5. Snaga elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW [7]	24
Slika 3.6. Okretni moment elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW [8].....	24
Slika 3.7. Vučna sila i otpori vožnje za trajan pogon elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW	28
Slika 3.8. Vučna sila i otpori vožnje pri preopterećenju elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajanju od najviše 2 minute	29
Slika 3.9. Ubrzanja vozila pogonjeno elektromotorom Ansaldo u pojedinim stupnjevima prijenosa	31
Slika 3.10. Brzine vozila pogonjeno elektromotorom Ansaldo ovisno o vremenu.....	32
Slika 3.11. Snaga i okretni moment elektromotora marke Hpevs model AC51 pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute [9].....	33
Slika 3.12. Snaga i okretni moment elektromotora Hpevs AC51 u trajnom pogonu [10]	33
Slika 3.13. Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje za elektromotor marke Hpevs model AC51 u trajnom pogonu	37
Slika 3.14. Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje za elektromotor Hpevs pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute	37
Slika 3.15. Ubrzanje vozila koje je pogonjeno elektromotorom Hpevs AC51 ovisno o vremenu	39
Slika 3.16. Ubrzanja vozila koje je pogonjeno elektromotorom Hpevs po pojedinim stupnjevima prijenosa.....	40
Slika 3.17. a) Vučni dijagram elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajnom pogonu, b) Vučni dijagram elektromotora Hpevs AC 51 u trajnom pogonu, c) Vučni dijagram izvornog Dieselog motora OM 611	42
Slika 3.18. a) Vučni dijagram elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute, b) Vučni dijagram elektromotora Hpevs AC 51 pri preopterećenju u trajanju najviše 2 minute, c) Vučni dijagram izvornog Dieselog motora OM 611	43
Slika 3.19. Usporedba ubrzanja vozila s različitim motorima prikazano brzinom vozila ovisnom o vremenu	44
Slika 3.20. Odabrani elektromotor Hpevs AC 51 [11].....	45
Slika 3.21. Način spajanja odabranog elektromotora Hpevs AC 51, redoslijedom s lijeva na desno su prikazani: izvorni zamašnjak, međuploča, adapter, pero i odabrani elektromotor Hpevs AC 51	45
Slika 3.22. Baterija U.S. Battery model US AGM 185 [13]	49
Slika 3.23. Dimenzije članka odabranih baterija GWL Power 260 Ah [14].....	52
Slika 3.24. Dimenzije i izgled kućišta baterija	53
Slika 3.25. Pregled dijelova kućišta baterija	54
Slika 3.26. Smještaj kućišta baterija označen je crvenom bojom na dispozicijskom crtežu vozila	55

Popis tablica

Tablica 1.1. Značajke vozila marke Mercedes-Benz model Sprinter 208 CDI.....	9
Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci različitih pogonskih koncepta	10
Tablica 3.1. Očitane vrijednosti momenta izvornog Diesellovog motora za određenu brzinu vrtnje	12
Tablica 3.2. Vučna sila u ovisnosti o stupnju prijenosa i brzini vožnje	12
Tablica 3.3. Otpori vožnje vozila	14
Tablica 3.4. Izračunato ubrzanje vozila koje je pogonjeno izvornim Diesellovim motorom u pojedinim stupnjevima prijenosa ovisno o brzini vožnje	16
Tablica 3.5. Očitane vrijednosti momenta za određenu brzinu vrtnje elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u kratkotrajnom pogonu.....	25
Tablica 3.6 Očitane vrijednosti momenta za određenu brzinu vrtnje elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajnom pogonu.....	26
Tablica 3.7. Vučna sila ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje pri preopterećenju elektromotora Ansaldo u trajanju od najviše 2 minute.....	26
Tablica 3.8. Vučna sila ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje u trajnom pogonu ...	26
Tablica 3.9. Otpori vožnje vozila	28
Tablica 3.10. Izračunato ubrzanje vozila pogonjenim elektromotorom Ansaldo u pojedinim stupnjevima prijenosa ovisno o brzini vožnje.....	31
Tablica 3.11. Očitani moment ovisno o broju okretaja motora.....	34
Tablica 3.12. Vučna sila ovisno o stupnju prijenosa i brzini vozila.....	35
Tablica 3.13. Vučna sila ovisno o stupnju prijenosa.....	35
Tablica 3.14. Otpori vožnje.....	36
Tablica 3.15. Izračunato ubrzanje ovisno o stupnju prijenosa i brzini vozila za elektromotor marke Hpevs model AC 51	39
Tablica 3.16. Usporedba rezultata pojedinih motora	41
Tablica 3.17. Usporedba baterija za potpuno električno vozilo	51
Tablica 4.1. Troškovnik preinake vozila u potpuno električno vozilo.....	56



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Leon Kuzmić**

Mat. br.: 0035184794

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Preinaka lakog dostavnog vozila u električno vozilo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modification of Light Duty Commercial Vehicle in Electric Vehicle**

Opis zadatka:

U tvrtci ČAKOM d.o.o. iz Čakovca nalazi se lako dostavno vozilo (kombi) koje je pogonjeno Dieslovim motorom. Zbog aktualnosti teme električnih vozila postojeće vozilo planira se preraditi u vozilo na električni pogon. Pri planiranju preinake razmotriti različite pogonske koncepte u smislu razine elektrifikacije (potpuno električno vozilo, hibridni pogon, hibridni pogon uz zadržavanje postojećeg pogona prednje osovine Ottovim motorom i ugradnju električnog motora za pogon stražnje osovine).

U okviru završnog rada potrebno je:

- Proučiti izvedbe postojećih preinaka vozila u vozila s električnim pogonom odnosno izvorno proizvedena električna vozila.
- Odrediti raspoloživi prostor za ugradnju potrebnih komponenti novog električnog sustava.
- Razmotriti različite mogućnosti ugradnje električnog pogonskog sustava.
- Izraditi proračun energetske potrebe za uobičajeni radni ciklus predmetnog vozila.
- Na temelju energetske potrebe odrediti karakteristike pogonskog sustava: karakteristike elektromotora (brzina vrtnje, snaga, moment) i baterija (tehnologija, kapacitet, masa, volumen).
- Proračunati performanse preinačenog vozila s električnim pogonom: ubrzanje, mogućnost svladavanja uspona i sl.
- Izraditi tehničku dokumentaciju pojedinih dijelova potrebnih za ugradnju pogonskog sustava.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:


 Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Igor Balen

1. Uvod

Cilj završnog rada je izraditi plan preinake postojećeg vozila tvrtke ČAKOM d.o.o. u električno vozilo.

U tvrtki ČAKOM d.o.o. nalazi se vozilo marke Mercedes-Benz model Sprinter 208 CDI. Vozilo se prvenstveno koristi za prijevoz na kraćim relacijama u sklopu svakodnevnih aktivnosti tvrtke ČAKOM. Vozilo je pogonjeno Dieslovim motorom čiji se moment prenosi na stražnju osovinu. Prvo će se osmisлити i razmotritи različiti pogonski koncepti u smislu razine elektrifikacije (potpuno električno vozilo, hibridni pogon) na temelju isplativosti i izvedivosti pojedinog konstrukcijskog rješenja.

Nakon toga će se razraditi i proračunati pogodni pogonski koncepti vozila prema kriterijima namjene vozila. Vozilo na jednom kapacitetu baterija mora imati domet od 90 km, a pogonski sustav mora biti projektiran tako da vozilo može postići i održavati konstantu brzinu od 90 km/h.

Krenut će se od elektromotora pogodnih za namjenu u električnim vozilima, tako što će se pronaći više motora i prema njima bit će određene performanse vozila, te će se na osnovu toga odreditи elektromotori koji su pogodni za primjenu na odabranom vozilu.

Nakon toga odredit će se vrsta, kapacitet i model baterija, te napraviti će se financijska pretpostavka preinake vozila u električno vozilo.



Slika 1.1. Vozilo Mercedes-Benz Sprinter 208 CDI [1]

Tablica 1.1. Značajke vozila marke Mercedes-Benz model Sprinter 208 CDI

Motor	4-cilindarski, Diesellov, prednabijani, hlađen tekućinom		
	Obujam (<i>cm</i> ³)	Snaga (kW)	Okretni moment (Nm)
	2,148	60	200
Prijenos	Pogonski kotači	Mjenjač	
	Stražnji	5 stupnjeva, ručni	
	Prijenosni omjer osovinskog reduktora		
	3,72		
	Prijenosni omjeri stupnjeva mjenjača		
	1. stupanj prijenosa	5,05	
	2. stupanj prijenosa	2,6	
	3. stupanj prijenosa	1,52	
	4. stupanj prijenosa	1	
	5. stupanj prijenosa	0,78	
Dimenzije	Širina (mm)	Dužina (mm)	Visina (mm)
	1933	5638	2595
	Međuosovinski razmak (mm)		
	4325		
Masa	Masa praznog vozila (kg)		Nosivost (kg)
	1890		1000

2. Pogonski koncepti

Za dostavno vozilo tvrtke ČAKOM d.o.o. ispitat će se koncept pogona isključivo elektromotorom i hibridni pogonski koncept.

Koncept potpuno električnog vozila bit će projektiran tako da se zadovolji autonomija od 90 km, da se može postići i održavati brzina od 90 km/h te da vozilo može savladati uspon do 20 %. Potpuno električno vozilo je osmišljeno tako da se zadrži izvorni prijenos vozila zajedno sa izvornim osovinskim reduktorom.

Koncept vozila s hibridnim pogonom osmišljen je kao vozilo koje je pogonjeno izvornim Dieslovim motorom koji bi se koristio za duže i izvangradske relacije osiguravajući tako autonomiju izvornog vozila, a električni pogonski sustav koristio bi se u gradskim relacijama te tada bi Dieslov motor bio u potpunosti isključen. Električni pogonski sustav bit će projektiran tako da maksimalna brzina vozila iznosi 50 km/h, a baterije dostatne za 25 km autonomije vozila isključivo na električni pogon.

Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci različitih pogonskih koncepta

Tip vozila	Prednosti	Nedostaci
Koncept potpuno električnog vozila	Jednostavnija izvedba, veća ekonomičnost, manja cijena održavanja, potrebno znatno manja količina preinaka na vozilu, jednostavnije upravljanje pogonskim sustavom	Manja autonomija vozila, slabije performanse vozila
Koncept vozila s hibridnim pogonom	Autonomija izvornog vozila, prema potrebi moguće ostvariti performanse izvornog vozila, moguć odabir vrste pogona, manja cijena komponenata električnog pogona	Kompliciranost izvedbe, nije potpuno električno vozilo, viša cijena održavanja, manja ekonomičnost, više konstruiranja, potrebno izvesti reduktor i spojku, potrebna modifikacija samonosive karoserije, kompliciranije upravljanje vozilom, veća cijena potrebnih radova

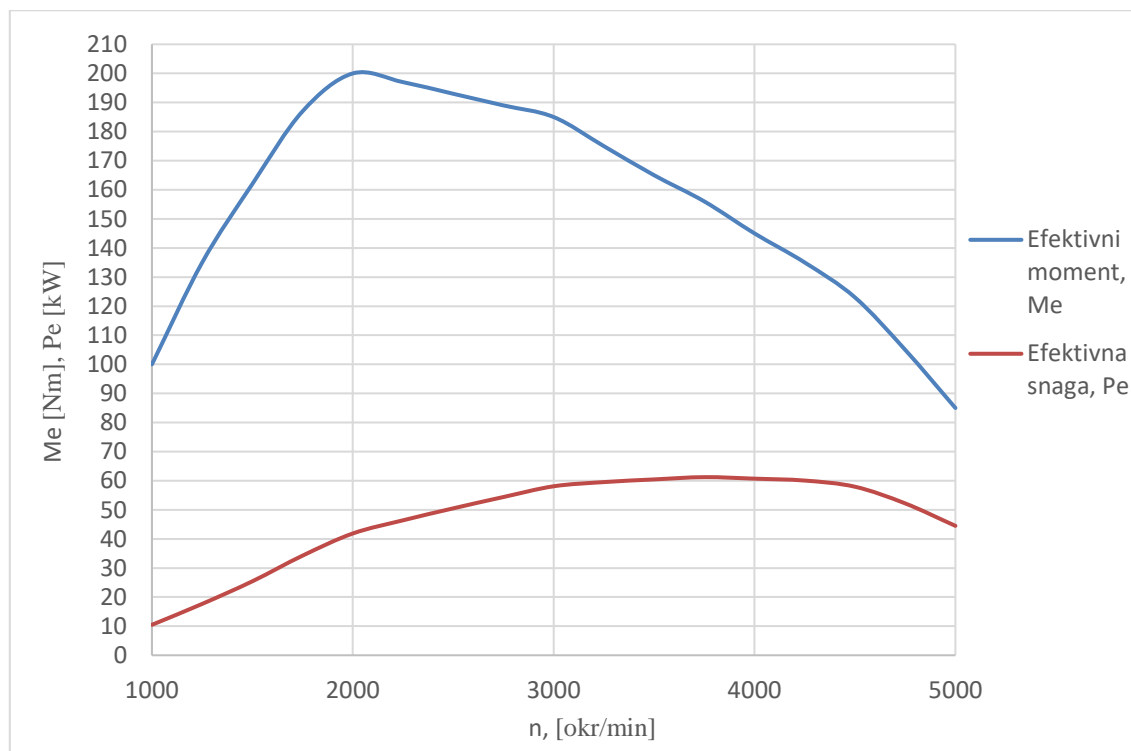
Razmatranjem koncepta vozila s hibridnim pogonom sa zadržavanjem izvornog Dieslovog motora nailazi se na sljedeće probleme: u motornom prostoru vozila nema dovoljno mjesta kako bi se ugradio i elektromotor. To znači da elektromotor mora biti ugrađen nakon prijenosa vozila, točnije, ispred pogonskog vratila ili ispred osovinskog reduktora, vezan nekom vrstom prijenosa. Zatim, za ovakvo konstrukcijsko rješenje nailazi se na sljedeće probleme: elektromotor bi trebao biti izveden zajedno s reduktorom budući da izravnim prijenosom na kardansko vratilo efektivno se simulira prijenosni omjer jednak 4. stupnju izvornog prijenosa vozila, potrebno bi bilo izvesti i spojku kako bi se mogao odvojiti elektromotor tijekom pogona Dieslovim motorom. Ugradnjom elektromotora s pogonom na kardansko vratilo potrebno je konstrukcijski riješiti problem koji nastaje zbog toga što kardansko vratilo je pomično vratilo, a elektromotor mora biti vezan za samonosivu konstrukciju vozila zbog svoje težine. Zbog prethodno navedenih problema određeno je da je isplativije vozilo tvrtke ČAKOM d.o.o. preinačiti u potpuno električno vozilo i u daljnjem proračunu baviti će se samo tom izvedbom preinake vozila u električno vozilo.

3. Proračun potpuno električnog vozila

3.1. Proračun izvornog Diesellovog motora OM611 za usporedbu rezultata

Izračunat će se performanse vozila koje je pogonjeno izvornim Diesellovim motorom oznake OM611 pri prijevozu mase tereta koji odgovara iznosu mase tereta pri kojoj preinačeno vozilo u električno vozilo dostiže svoju punu nosivost.

Karakteristike motora



Slika 3.1. Snaga i moment izvornog Diesellovog motora OM 611

Vučna sila

Za sve stupnjeve prijenosa u mjenjaču izračunat će se vučna sila na kotaču u ovisnosti o brzini vožnje (km/h) i prikazati vučnim dijagramom. [2]

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču

$$F_v = \frac{M_p}{r_{din}} = \frac{M_e \cdot i_{uk} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

M_p - pogonski moment na kotaču, Nm

i_{uk} - ukupni prijenosni omjer, -

r_{din} - dinamički radijus kotača, m

M_e - efektivni moment motora, Nm

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa

$$F_{V,i} = \frac{M_e \cdot i_{m,i} \cdot i_{or} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

$F_{V,i}$ - sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa, N

i_{or} - prijenosni omjer osovinskog reduktora, -

- Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{din}}{i_{m,i} \cdot i_{or}}$$

gdje je:

v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj
brzini vrtnje motora, $\frac{m}{s}$

n - brzina vrtnje motora, s^{-1}

- Vrijednost M_e u ovisnosti od brzini vrtnje očitava se iz dijagrama snage i momenta motora

Tablica 3.1. Očitane vrijednosti momenta izvornog Dieselog motora za određenu brzinu vrtnje

n [o/min]	M_e [Nm]
1000	100
2000	200
3000	185
4000	145
5000	85

- Izračunata vučna sila ovisno o brzini vožnje i stupnju prijenosa

Tablica 3.2. Vučna sila u ovisnosti o stupnju prijenosa i brzini vožnje

	n	1000	2000	3000	4000	5000
1	v_1	8,0	14,5	20,9	27,3	32,1
	F_{v1}	7123,9	10395,6	9234,7	7123,9	4485,4
2	v_2	15,6	28,1	40,6	53,1	62,4
	F_{v2}	3667,8	5352,2	4754,5	3667,8	2309,3
3	v_3	26,7	48,1	69,4	90,8	106,8
	F_{v3}	2144,2	3129,0	2779,6	2144,2	1350,1
4	v_4	40,6	73,1	105,5	138,0	162,3
	F_{v4}	1410,7	2058,5	1828,7	1410,7	888,2
5	v_5	52,0	93,7	135,3	176,9	208,1
	F_{v5}	1100,3	1605,7	1426,3	1100,3	692,8

Vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje

Na slici 3.2. dan je vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje na horizontalnoj podlozi te za uspone od 5 %, 10 % i 20 % bez protuvjetrova.

- Otpor kotrljanja

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \quad [\text{N}]$$

gdje je:

f_k - faktor otpora kotrljanja, -

m_v - masa vozila, kg

F_k - sila otpora kotrljanja, N

g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- Otpor zraka

$$p_z = \frac{\rho_z \cdot (v + v_0)^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

gdje je:

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

p_z - dinamički tlak zraka, Pa

v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

v_0 - brzina protuvjetrova, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$F_Z = p_z \cdot c_w \cdot A \quad [\text{N}]$$

gdje je:

p_z - dinamički tlak zraka, Pa

c_w - faktor otpora zraka, -

A - čelna površina vozila, m^2

F_Z - sila otpora zraka, N

- Otpor uspona

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

gdje je:

F_u - sila otpora uspona, N

g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

α - kut uspona podloge, °

- Ukupni otpori vožnje

$$F_R = F_Z + F_k + F_u \quad [\text{N}]$$

gdje je:

F_R - ukupni otpor vožnje, N

F_Z - sila otpora zraka, N

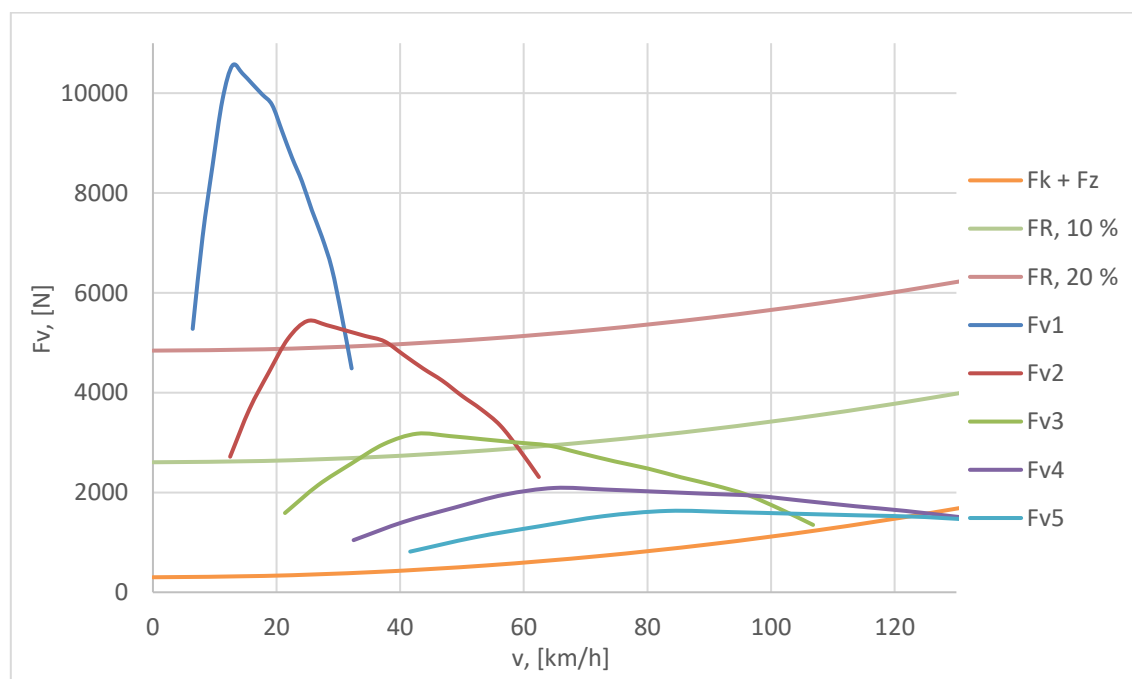
F_k - sila otpora kotrljanja, N

F_u - sila otpora uspona, N

Izračunati otpori vožnje

Tablica 3.3. Otpori vožnje vozila

$v, [\text{m/s}]$	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
$v, [\text{km/h}]$	0,0	18,0	36,0	54,0	72,0	90,0	108,0	126,0
F_k	301,0	301,0	301,0	301,0	301,0	301,0	301,0	301,0
F_z	0,0	26,4	105,5	237,3	421,9	659,2	949,3	1292,1
$F_k + F_z$	301,0	327,3	406,4	538,3	722,9	960,2	1250,3	1593,0
$F_{u,5\%}$	1156,1	1156,1	1156,1	1156,1	1156,1	1156,1	1156,1	1156,1
$F_{R,5\%}$	1457,1	1483,5	1562,6	1694,4	1879,0	2116,3	2406,4	2749,2
$F_{u,10\%}$	2303,7	2303,7	2303,7	2303,7	2303,7	2303,7	2303,7	2303,7
$F_{R,10\%}$	2604,6	2631,0	2710,1	2842,0	3026,5	3263,9	3553,9	3896,7
$F_{u,20\%}$	4540,4	4540,4	4540,4	4540,4	4540,4	4540,4	4540,4	4540,4
$F_{R,20\%}$	4841,4	4867,7	4946,8	5078,7	5263,3	5500,6	5790,7	6133,4



Slika 3.2. Vučna sila izvornog Diesellovog motora OM 611 ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje

Ubrzanje vozila

Ubrzanje vozila u pojedinom stupnju prijenosa, ovisno o vremenu i prijeđenom putu prilikom ubrzanja vozila na ravnoj cesti bez uspona.

-Ubrzanje vozila

$$a = \frac{P_e \cdot \eta_m - P_R}{v \cdot k_m \cdot m_v} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

gdje je:

- a - ubrzanje vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- P_e - efektivna snaga motora, W
- m_v - masa vozila, kg
- v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- η_m - mehanički stupanj korisnosti, -
- P_R - snaga potrebna za savladavanje otpora vožnje, W

-Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{\text{din}}}{i_{m,i} \cdot i_{\text{or}}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

gdje je:

- v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj brzini vrtnje motora, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- i_{or} - prijenosni omjer osovine redukcije, -
- $i_{m,i}$ - prijenosni omjer pojedinog stupnja prijenosa, -
- r_{din} - dinamički radijus kotača, m
- n - brzina vrtnje motora, s^{-1}
- π - Ludolfov broj, -

-Snaga za savladavanje otpora kotrljanja

$$P_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot v \quad [\text{W}]$$

gdje je:

- g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- f_k - faktor otpora kotrljanja, -
- P_k - snaga za savladavanje otpora kotrljanja

-Snaga za savladavanje otpora zraka

$$P_z = \frac{\rho_z \cdot c_w \cdot A \cdot v}{2} \quad [\text{W}]$$

gdje je:

- P_z - snaga za savladavanje otpora zraka, W
- c_w - faktor otpora zraka, -
- A - čelona površina vozila, m^2
- v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

-Ukupna snaga za savladavanje otpora vožnje

$$P_R = P_Z + P_k \quad [\text{W}]$$

gdje je:

P_R - snaga potrebna za savladavanje ukupnog otpora vožnje, W

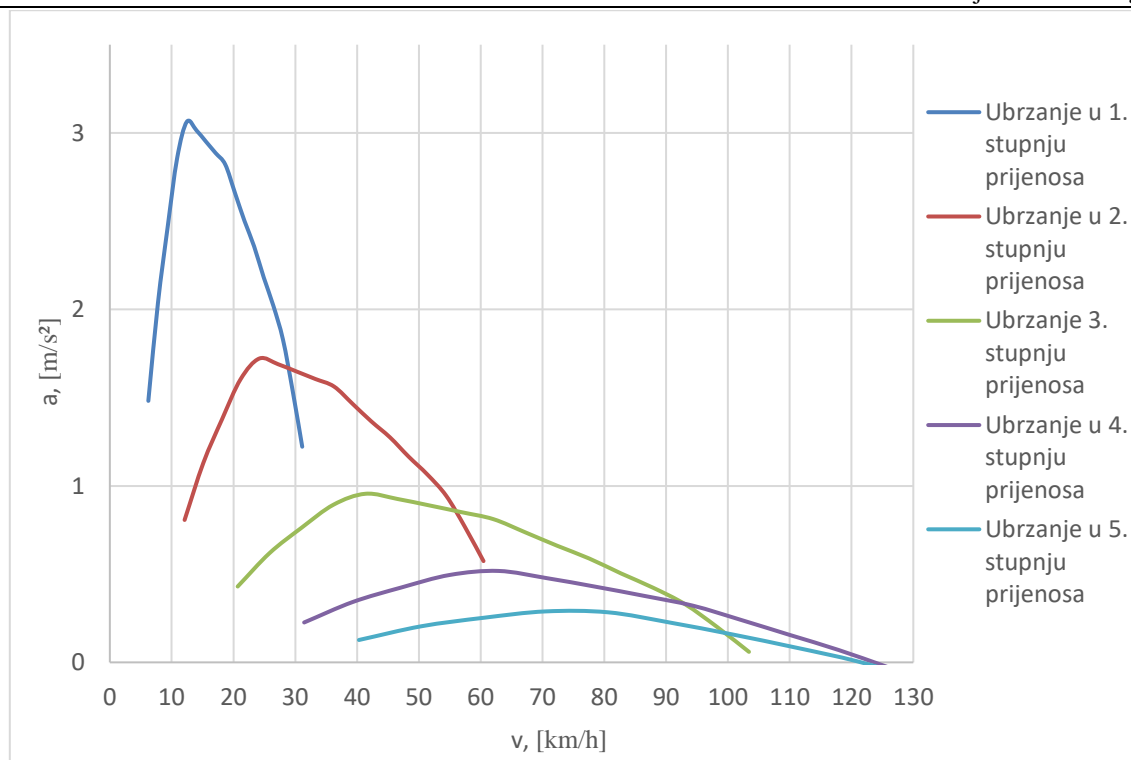
P_Z - snaga potrebna za savladavanje otpora zraka, W

P_k - snaga potrebna za savladavanje otpora kotrljanja, W

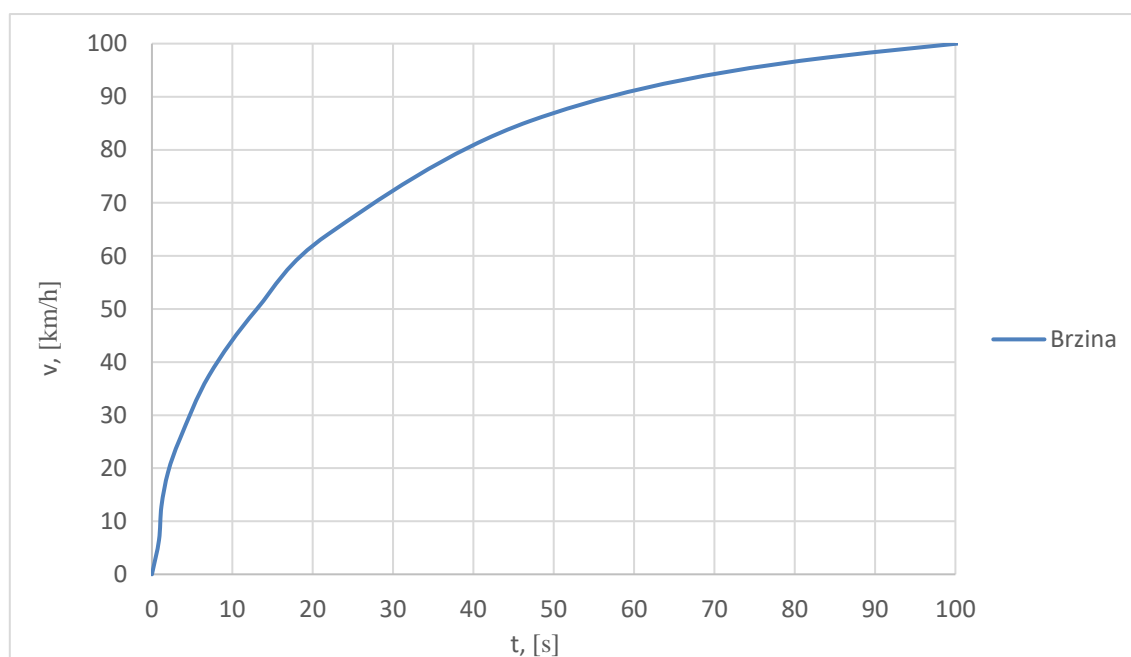
Izračunato ubrzanje

Tablica 3.4. Izračunato ubrzanje vozila koje je pogonjeno izvornim Diesellovim motorom u pojedinim stupnjevima prijenosa ovisno o brzini vožnje

	n	1000	2000	3000	4000	5000
	P_e	10,5	41,9	58,1	60,7	44,5
1	v_1	6,2	12,4	18,7	24,9	31,1
	P_R	0,6	1,3	2,0	2,8	3,7
	a_1	8,1	4,3	2,5	-0,1	-0,1
2	v_2	12,1	24,2	36,3	48,4	60,5
	P_R	1,2	2,7	4,6	7,3	10,9
	a_2	4,7	2,4	1,4	-0,2	-0,2
3	v_3	20,7	41,4	62,0	82,7	103,4
	P_R	2,2	5,6	11,4	20,8	35,0
	a_3	2,8	1,4	0,7	-0,3	-0,4
4	v_4	31,4	62,9	94,3	125,7	157,2
	P_R	3,8	11,7	28,1	57,2	103,0
	a_4	1,8	0,8	0,3	-0,6	-0,8
5	v_5	40,3	80,6	120,9	161,2	201,5
	P_R	5,4	19,7	51,7	110,4	204,6
	a_5	1,4	0,5	0,0	-0,9	-1,3



Slika 3.3. Ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa vozila koje je pogonjeno izvornim Diesellovim motorom



Slika 3.4. Brzina vozila ovisna o vremenu koje je pogonjeno izvornim Diesellovim motorom

3.2. Proračun zahtjeva za elektromotor

Proračunat će se sljedeći zahtjevi za elektromotor:

- 1.) Potreban efektivni moment motora u trajnom pogonu, kako bi vozilo pri punom opterećenju moglo savladavati uspone od 20 %.
- 2.) Potrebna efektivna snaga motora pri brzini vrtnje od $n = 4122 \frac{\text{okr}}{\text{min}}$ u trajnom pogonu, kako bi vozilo pri punom opterećenju moglo održavati brzinu vožnje od 90 km/h.

Proračun zahtjeva za elektromotor:

1.) Potrebni efektivni moment motora

$$M_{e,\text{pot}} > \frac{F_v \cdot r_d}{i_{\text{UK}} \cdot \eta_m} \quad (1)$$

gdje je:

$M_{e,\text{pot}}$ - potreban efektivni moment motora, N

F_v - vučna sila prenesena na podlogu, N

r_d - dinamički radijus kotača, m

i_{UK} - ukupni prijenosni omjer, -

η_m - mehanički stupanj korisnosti prijenosnika snage, -

Ukupni prijenosni omjer u 1. stupnju prijenosa

$$i_{\text{UK}} = i_{m,1} \cdot i_{\text{or}} \quad (2)$$

gdje je:

$i_{m,1}$ - prijenosni omjer 1. stupnja prijenosa, -

i_{or} - prijenosni omjer osovinskog reduktora, -

$$i_{\text{UK}} = i_{m,1} \cdot i_{\text{or}} = 5,05 \cdot 3,72 = 18,786 \quad (3)$$

Vučna sila

$$F_v = F_k + F_z + F_u + F_a \quad (4)$$

gdje je:

F_v - vučna sila, N

F_k - otpor kotrljanja, N

F_u - otpor uspona, N

F_a - otpor ubrzavanja, N

Otpor kotrljanja

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}] \quad (5)$$

gdje je:

f_v - faktor otpora kotrljanja, -
 m_v - ukupna masa vozila, kg
 g - ubrzanje (9,81), $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
 α - kut uspona podloge, °

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,013 \cdot 2800 \cdot 9,81 \cdot \cos(11,31) = 350,15 \text{ N} \quad (6)$$

Otpor zraka

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v + v_0)^2}{2} \cdot c_w \cdot A \quad [\text{N}] \quad (7)$$

gdje je:

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
 v_0 - brzina protuvjetra, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
 c_w - faktor otpora zraka, -
 A - čelna površina vozila, m^2

$$F_z = 1,202 \cdot \frac{(2,777-0)^2}{2} \cdot 0,45 \cdot 3,9 = 8,124 \text{ N} \quad (8)$$

Otpor uspona

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad [\text{N}] \quad (9)$$

gdje je:

m_v - masa vozila, kg
 g - ubrzanje (9,81), $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
 α - kut uspona podloge, °

$$F_u = 2800 \cdot 9,81 \cdot \sin(11,31) = 5386,95 \text{ N} \quad (10)$$

Uvrstimo (4), (5) i (6) u (3)

$$F_v = F_k + F_z + F_u + F_a = 350,15 + 8,124 + 5386,95 + 0 = 5745,22 \text{ N} \quad (11)$$

Mehanički stupanj korisnosti prijenosnika snage

$$\eta_m = \eta_{mj} \cdot \eta_k \cdot \eta_{or} \quad (12)$$

gdje je:

η_m - mehanički stupanj korisnosti prijenosa, -
 η_{mj} - mehanički stupanj korisnosti mjenjača, -
 η_{or} - mehanički stupanj korisnosti osovinskog reduktora, -
 η_k - mehanički stupanj korisnosti kardanskog prijenosa, -

$$\eta_m = \eta_{mj} \cdot \eta_k \cdot \eta_{or} = 0,97 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 0,922 \quad (13)$$

Dinamički radijus kotača

$$r_d \approx \frac{d_{\text{kot}}}{2} \quad (14)$$

gdje je:

r_d - dinamički radijus kotača, m

d_{kot} - promjer kotača, m

$$r_d \approx \frac{d_{\text{kot}}}{2} = \frac{0,654}{2} = 0,327 \text{ m} \quad (15)$$

Uvrstimo (3), (11), (13) i (15) u (1)

$$M_{\text{e,pot}} > \frac{F_v \cdot r_d}{i_{\text{UK}} \cdot \eta_m} = \frac{5745,22 \cdot 0,327}{18,786 \cdot 0,922} = 108,47 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{e,pot}} > 108,47 \text{ Nm}$$

2. Efektivna snaga motora u trajnom pogonu

Brzina vrtnje elektromotora pri kojoj vozilo se u 3. stupnju prijenosa kreće brzinom od 90 km/h

$$\omega = \frac{v \cdot i_{UK,3}}{r_d} \quad (16)$$

Ukupni prijenosni omjer u 3. stupnju prijenosa

$$i_{UK,3} = i_{m,3} \cdot i_{or} \quad (17)$$

gdje je:

$i_{m,3}$ - prijenosni omjer 3. stupnja prijenosa, -

i_{or} - prijenosni omjer osovinskog reduktora, -

$$i_{UK,3} = 1,52 \cdot 3,72 = 5,65 \quad (18)$$

Uvrstimo (15) i (18) u (16):

$$\omega = \frac{v \cdot i_{UK,3}}{r_d} = \frac{25 \cdot 5,65}{0,327} = 431,69 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (19)$$

odnosno:

$$n = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} = \frac{431,69 \cdot 30}{\pi} = 4122,34 \frac{\text{okr}}{\text{min}} \quad (20)$$

Potrebna efektivna snaga motora kako bi se postigla i održavala brzina od 90 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

$$P_{e,pot} > M_{e,pot} \cdot \omega = \frac{F_v \cdot r_d}{i_{UK,3} \cdot \eta_m} \cdot \omega \quad (21)$$

gdje je:

$M_{e,pot}$ - potreban efektivni moment motora, N

F_v - vučna sila prenesena na podlogu, N

r_d - dinamički radijus kotača, m

$i_{UK,3}$ - ukupni prijenosni omjer 3. stupnja prijenosa, -

η_m - mehanički stupanj korisnosti prijenosnika snage, -

ω - kutna brzina, $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Vučna sila

$$F_v = F_k + F_z + F_u + F_a \quad (24)$$

gdje je:

F_v - vučna sila, N

F_k - otpor kotrljanja, N

F_u - otpor uspona, N

F_a - otpor ubrzavanja, N

Otpor kotrljanja

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \text{ [N]} \quad (25)$$

gdje je:

f_v - faktor otpora kotrljanja, -
 m_v - ukupna masa vozila, kg
 g - ubrzanje (9,81), $\frac{m}{s^2}$
 α - kut uspona podloge, °

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,013 \cdot 2800 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 350,15 \text{ N} \quad (26)$$

Otpor zraka

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v + v_0)^2}{2} \cdot c_w \cdot A \text{ [N]} \quad (27)$$

gdje je:

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{kg}{m^3}$
 v - brzina vozila, $\frac{m}{s}$
 v_0 - brzina protuvjetra, $\frac{m}{s}$
 c_w - faktor otpora zraka, -
 A - čelna površina vozila, m^2

$$F_z = 1,202 \cdot \frac{(25-0)^2}{2} \cdot 0,45 \cdot 3,9 = 659,22 \text{ N} \quad (28)$$

Uvrstimo (26) i (28) u (24)

$$F_v = F_k + F_z + F_u + F_a = 350,15 + 659,22 + 0 + 0 = 1009,372 \text{ N} \quad (29)$$

Uvrstimo (13), (15), (19) i (29) u (21)

$$P_{e,pot} > M_{e,pot} \cdot \omega = \frac{F_v \cdot r_d}{i_{UK,3} \cdot \eta_m} \cdot \omega = \frac{1009,372 \cdot 0,327}{5,65 \cdot 0,922} \cdot 431,69 = 27,35 \text{ kW} \quad (30)$$

$$P_{e,pot} > 27,35 \text{ kW} \quad (31)$$

3.3. Proračun elektromotora

Ispitivanjem tržišta pronađeni su sljedeći elektromotori pogodni za odabrano vozilo:

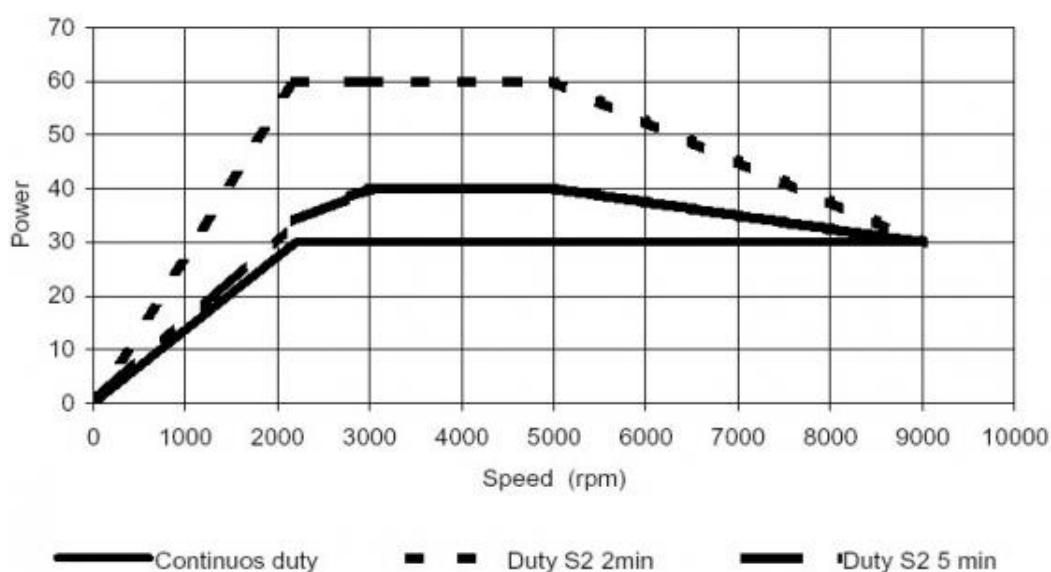
- Ansaldo model Drive 30-60 kW [3]
- Hpevs model AC 51 [4]

Za te elektromotore izradit će se vučni dijagram i ubrzanje vozila. Vučni dijagram i ubrzanje vozila proračunati će se za dopuštenu nosivost vozila simulirajući tako vozilo pri punom opterećenju. Tako će se proračunati performanse vozila pri punom opterećenju kako bi bilo sigurno da odabrano vozilo zadovoljava kriterije maksimalne brzine od 90 km/h i savladavanja uspona do 20 %.

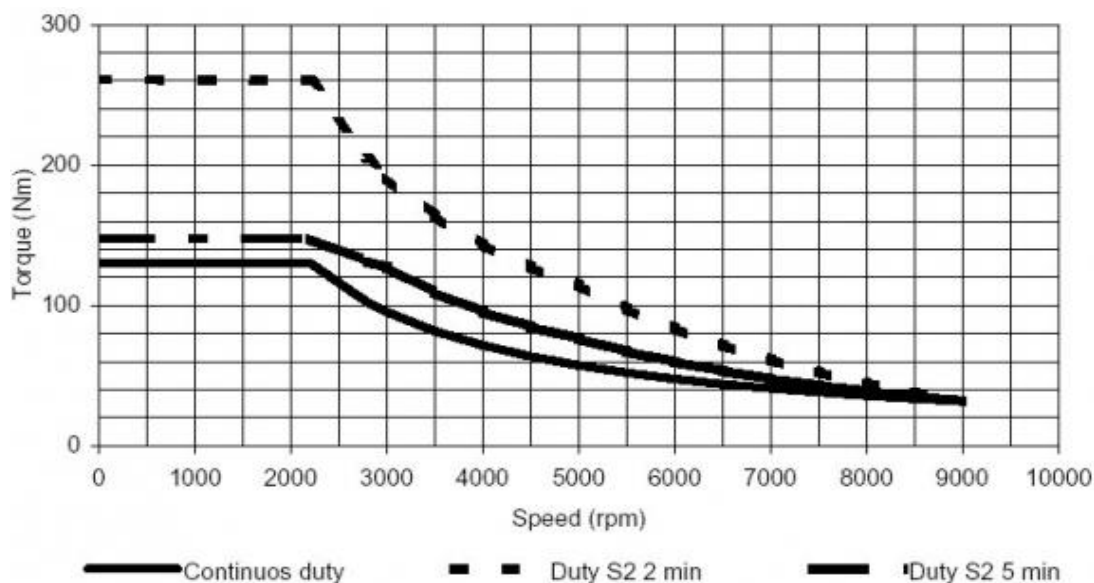
Elektromotor tvrtke Ansaldo model Drive 30-60 kW

Elektromotor tvrtke Ansaldo, model Drive 30-60 kW je izmjenični asinkroni kavezni trofazni motor. Nazivna snaga ovog motora je 30 kW, pri preopterećenju elektromotora u trajanju od najviše 5 minuta je 40 kW, a za preopterećenje elektromotora u trajanju od najviše 2 minute je 60 kW pri nominalnom naponu od 288 V. Primjenjuje se kao pogon električnih vozila. Ovaj elektromotor je hlađen tekućinom, te dolazi uparen s frekvencijskim pretvaračem marke IGBT. Serijski se ugrađivao u razna dostavna vozila kao što su Micro-Vett Electric Fiat Fiorino [5] i Karabag Electric Fiorino [6]. Usporedbom najveće snage vidi se da je ovaj elektromotor približno jednake snage kao i izvorni motor odabranog vozila.

Karakteristike motora



Slika 3.5. Snaga elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW [7]



Slika 3.6. Okretni moment elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW [8]

Vučna sila

Za sve stupnjeve prijenosa u mjenjaču izračunati će se vučna sila na kotaču u ovisnosti o brzini vožnje (km/h) i prikazati vučnim dijagramom.

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču

$$F_v = \frac{M_p}{r_{din}} = \frac{M_e \cdot i_{uk} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

M_p - pogonski moment na kotaču, Nm

i_{uk} - ukupni prijenosni omjer, -

r_{din} - dinamički radijus kotača, m

M_e - efektivni moment motora, Nm

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa

$$F_{v,i} = \frac{M_e \cdot i_{m,i} \cdot i_{or} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

$F_{v,i}$ - sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa, N

i_{or} - prijenosni omjer osovinskog reduktora, -

- Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{din}}{i_{m,i} \cdot i_{or}}$$

gdje je:

v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj brzini vrtnje motora, $\frac{m}{s}$

n - brzina vrtnje motora, s^{-1}

- Vrijednost M_e u ovisnosti od brzini vrtnje očitava se iz dijagrama snage i momenta motora

Tablica 3.5. Očitane vrijednosti momenta za određenu brzinu vrtnje elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u kratkotrajnom pogonu

n [o/min]	M_e [Nm]
1000	260
2000	260
3000	190
4000	132
5000	117
6000	80
7000	60
8000	44
9000	30

Tablica 3.6 Očitane vrijednosti momenta za određenu brzinu vrtnje elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajnom pogonu.

n [o/min]	M_e [Nm]
1000	127,3
2000	127,3
3000	95,5
4000	71,6
5000	57,3
6000	47,7
7000	40,9
8000	35,8
9000	31,8

- Izračunata vučna sila ovisno o brzini vožnje i stupnju prijenosa

Tablica 3.7. Vučna sila ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje pri preopterećenju elektromotora Ansaldo u trajanju od najviše 2 minute

	n	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
1	v_1	6,4	12,9	19,3	25,7	32,1	38,6	45,0	51,4	57,9
	F_{v1}	13720,1	13720,1	10290,2	7717,6	6174,1	4502,0	3307,6	2411,8	1715,0
2	v_2	12,5	25,0	37,5	50,0	62,4	74,9	87,4	99,9	112,4
	F_{v2}	7063,8	7063,8	5297,9	3973,4	3178,8	2317,8	1702,9	1241,7	883,0
3	v_3	21,4	42,7	64,1	85,4	106,8	128,2	149,5	170,9	192,3
	F_{v3}	4129,6	4129,6	3097,2	2322,9	1858,3	1355,0	995,5	725,9	516,2

Tablica 3.8. Vučna sila ovisna o stupnju prijenosa i brzini vožnje u trajnom pogonu

	n	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
1	v_1	6,4	12,9	19,3	25,7	32,1	38,6	45,0	51,4	57,9
	F_{v1}	6718,7	6718,7	5039,1	3779,4	3023,5	2519,6	2159,6	1889,7	1679,7
2	v_2	12,5	25,0	37,5	50,0	62,4	74,9	87,4	99,9	112,4
	F_{v2}	3459,1	3459,1	2594,4	1945,8	1556,6	1297,2	1111,9	972,9	864,8
3	v_3	21,4	42,7	64,1	85,4	106,8	128,2	149,5	170,9	192,3
	F_{v3}	2022,3	2022,3	1516,7	1137,5	910,0	758,4	650,0	568,8	505,6

Vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje

Na slici 3.7. i 3.8. dan je vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje na horizontalnoj podlozi te za uspone od 5 %, 10 % i 20 % bez protuvjetrova. Vučni dijagram izračunat je i prikazan za trajni pogon i za pogon pri preopterećenju elektromotora u trajanju od najviše 2 minute.

- Otpor kotrljanja

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \quad [\text{N}]$$

gdje je:

f_k - faktor otpora kotrljanja, -
 m_v - masa vozila, kg
 F_k - sila otpora kotrljanja, N
 g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- Otpor zraka

$$p_z = \frac{\rho_z \cdot (v + v_0)^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

gdje je:

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 p_z - dinamički tlak zraka, Pa
 v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
 v_0 - brzina protuvjetrova, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$F_z = p_z \cdot c_w \cdot A \quad [\text{N}]$$

gdje je:

p_z - dinamički tlak zraka, Pa
 c_w - faktor otpora zraka, -
 A - čelna površina vozila, m^2
 F_z - sila otpora zraka, N

- Otpor uspona

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

gdje je:

F_u - sila otpora uspona, N
 g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
 α - kut uspona podloge, $[\circ]$

- Ukupni otpori vožnje

$$F_R = F_z + F_k + F_u \quad [\text{N}]$$

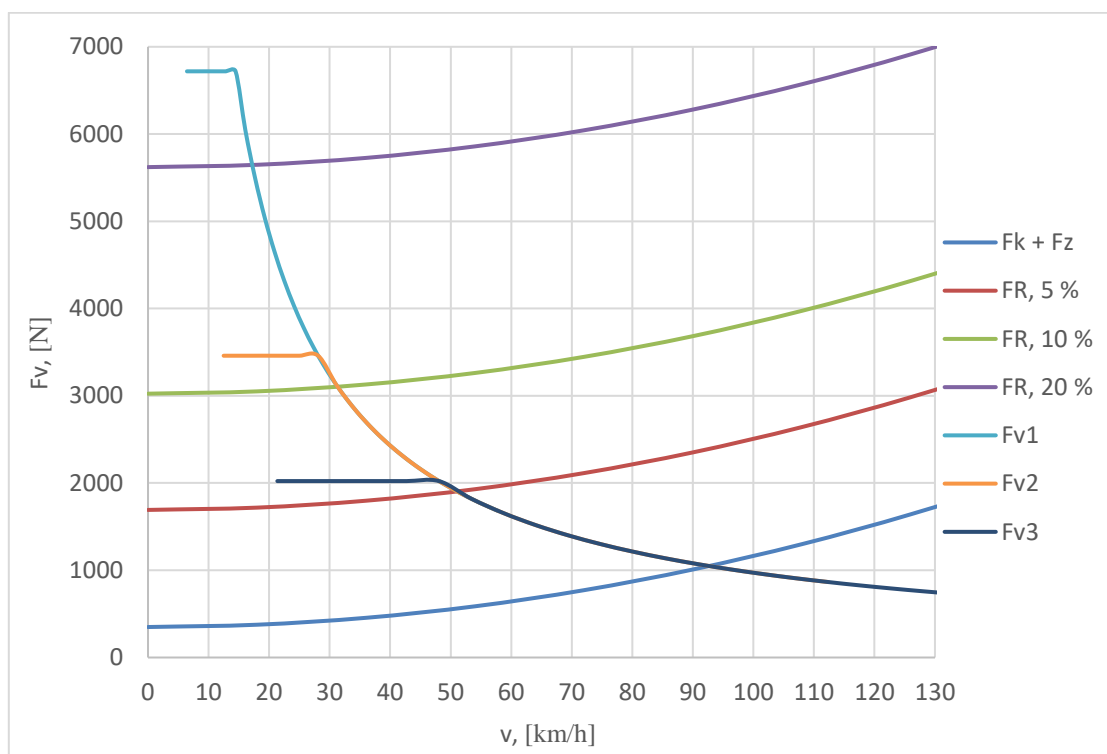
gdje je:

F_R - ukupni otpor vožnje, N
 F_z - sila otpora zraka, N
 F_k - sila otpora kotrljanja, N
 F_u - sila otpora uspona, N

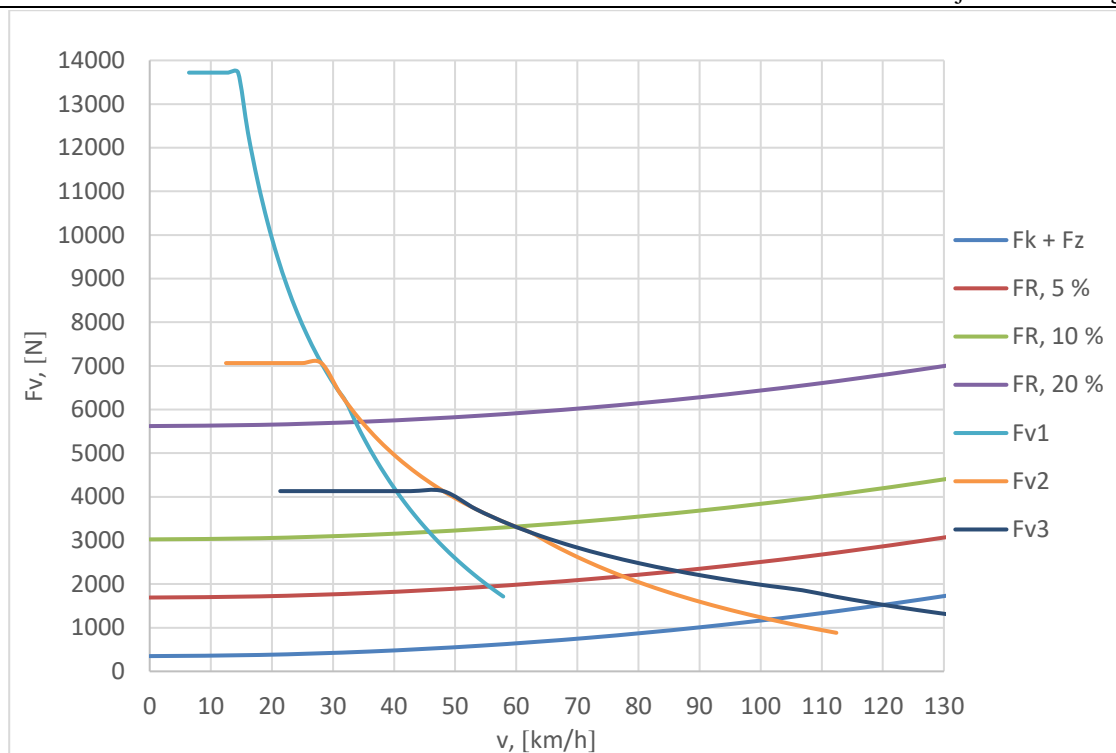
Izračunati otpori vožnje

Tablica 3.9. Otpori vožnje vozila

$v, [\text{m/s}]$	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$v, [\text{km/h}]$	0,0	18,0	36,0	54,0	72,0	90,0	108,0
F_k	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4
F_z	0,0	26,4	105,5	237,3	421,9	659,2	949,3
$F_k + F_z$	349,4	375,8	454,9	586,8	771,3	1008,7	1298,7
$F_{u,5\%}$	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3
$F_{R,5\%}$	1691,7	1718,1	1797,2	1929,0	2113,6	2350,9	2641,0
$F_{u,10\%}$	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6
$F_{R,10\%}$	3024,0	3050,4	3129,5	3261,4	3445,9	3683,3	3973,3
$F_{u,20\%}$	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5
$F_{R,20\%}$	5620,9	5647,3	5726,4	5858,2	6042,8	6280,1	6570,2



Slika 3.7. Vučna sila i otpori vožnje za trajan pogon elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW



Slika 3.8. Vučna sila i otpori vožnje pri preopterećenju elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajanju od najviše 2 minute

Ubrzanje vozila

Ubrzanje vozila u pojedinom stupnju prijenosa, ovisno o vremenu i prijeđenom putu prilikom ubrzanja vozila na ravnoj cesti bez uspona.

-Ubrzanje vozila

$$a = \frac{P_e \cdot \eta_m - P_R}{v \cdot k_m \cdot m_v} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

gdje je:

a - ubrzanje vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

P_e - efektivna snaga motora, W

m_v - masa vozila, kg

v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

η_m - mehanički stupanj korisnosti, -

P_R - snaga potrebna za savladavanje otpora vožnje, W

-Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{\text{din}}}{i_{m,i} \cdot i_{\text{or}}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

gdje je:

v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj brzini vrtnje motora, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

i_{or} - prijenosni omjer osovine redukcije, -

$i_{m,i}$ - prijenosni omjer pojedinog stupnja prijenosa, -

r_{din} - dinamički radijus kotača, m

n - brzina vrtnje motora, s^{-1}

π - Ludolfov broj, -

-Snaga za savladavanje otpora kotrljanja

$$P_K = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot v \quad [\text{W}]$$

gdje je:

g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

f_k - faktor otpora kotrljanja, -

P_K - snaga za savladavanje otpora kotrljanja

-Snaga za savladavanje otpora zraka

$$P_Z = \frac{\rho_z \cdot c_w \cdot A \cdot v}{2} \quad [\text{W}]$$

gdje je:

P_Z - snaga za savladavanje otpora zraka, W

c_w - faktor otpora zraka, -

A - čelna površina vozila, m^2

v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

-Ukupna snaga za savladavanja otpora vožnje

$$P_R = P_Z + P_K \quad [\text{W}]$$

gdje je:

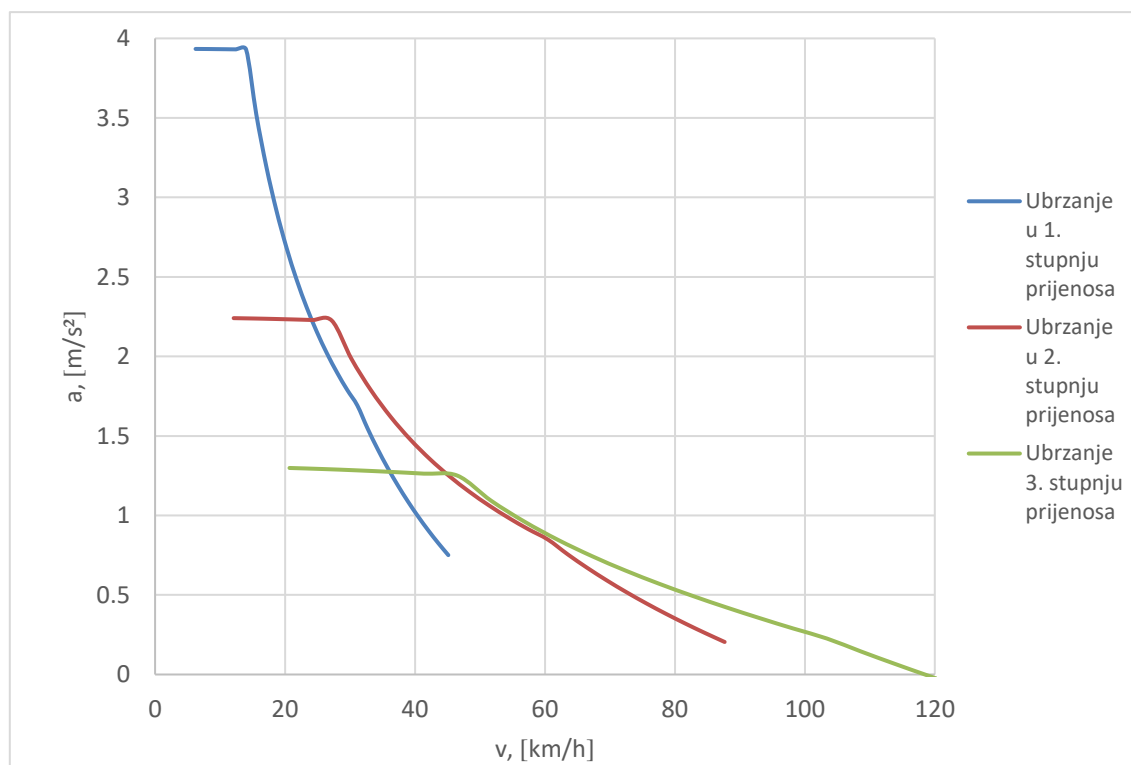
P_R - snaga potrebna za savladavanje ukupnog otpora vožnje, W

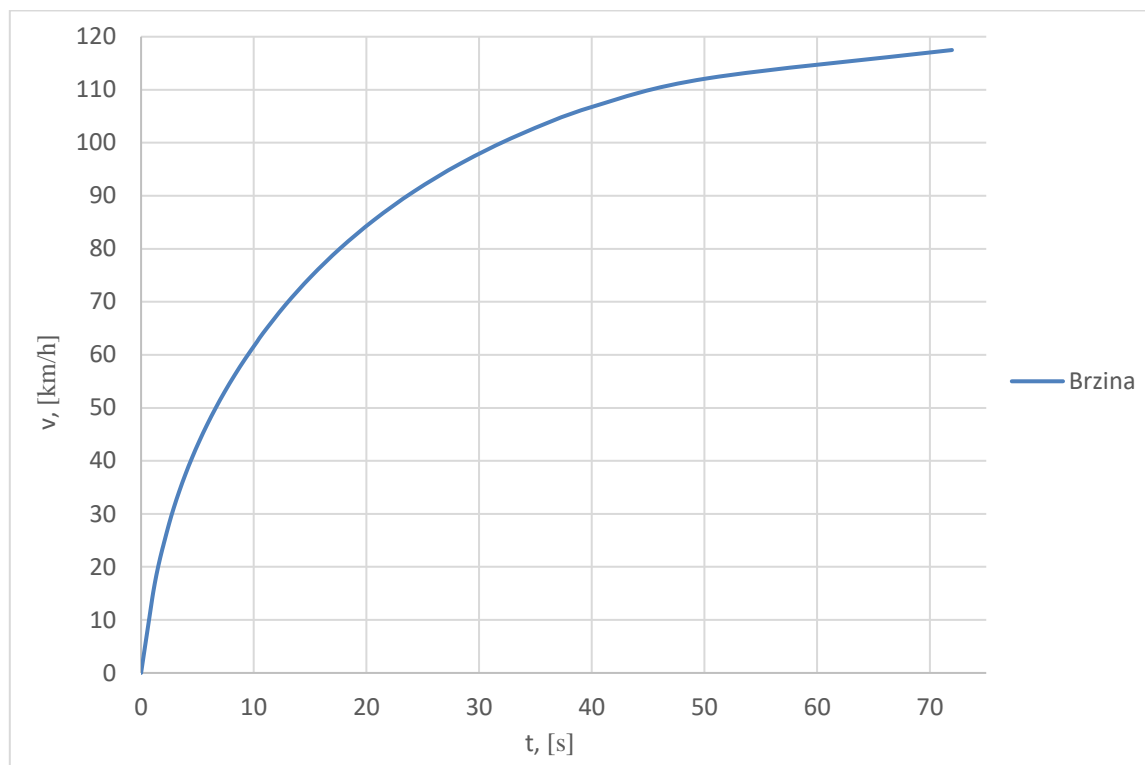
P_Z - snaga potrebna za savladavanje otpora zraka, W

P_K - snaga potrebna za savladavanje otpora kotrljanja, W

Izračunato ubrzanje*Tablica 3.10. Izračunato ubrzanje vozila pogonjenim elektromotorom Ansaldo u pojedinim stupnjevima prijenosa ovisno o brzini vožnje*

	<i>n</i>	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
1	<i>P_e</i>	26,7	53,3	60,0	60,0	60,0	52,5	45,0	37,5	30,0
	<i>v₁</i>	6,2	12,4	18,7	24,9	31,1	37,3	43,6	49,8	56,0
	<i>P_R</i>	0,6	1,3	2,0	2,8	3,7	4,8	6,1	7,6	9,4
	<i>a₁</i>	3,9	3,9	2,9	2,2	1,7	1,2	0,8	0,5	0,3
2	<i>v₂</i>	12,1	24,2	36,3	48,4	60,5	72,5	84,6	96,7	108,8
	<i>P_R</i>	1,2	2,7	4,6	7,3	10,9	15,7	21,9	29,8	39,7
	<i>a₂</i>	2,2	2,2	1,6	1,1	0,8	0,5	0,3	0,0	-0,1
3	<i>v₃</i>	20,7	41,4	62,0	82,7	103,4	124,1	144,8	165,5	186,1
	<i>P_R</i>	2,2	5,6	11,4	20,8	35,0	55,2	82,6	118,5	163,9
	<i>a₃</i>	1,3	1,3	0,8	0,5	0,2	-0,1	-0,4	-0,6	-0,9

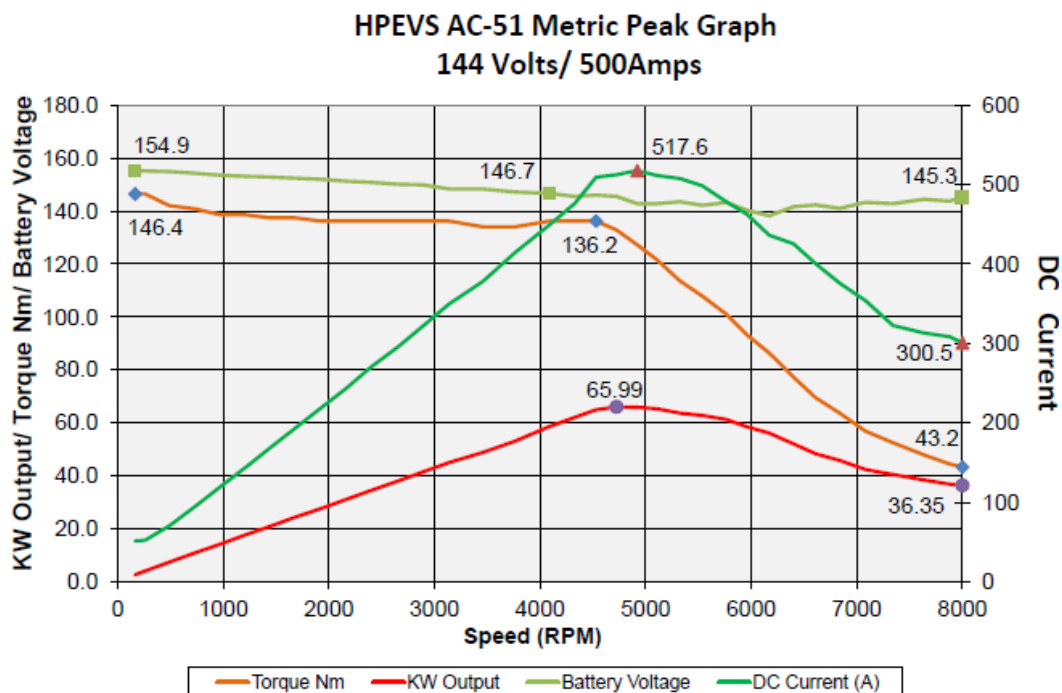
*Slika 3.9. Ubrzanja vozila pogonjeno elektromotorom Ansaldo u pojedinim stupnjevima prijenosa*



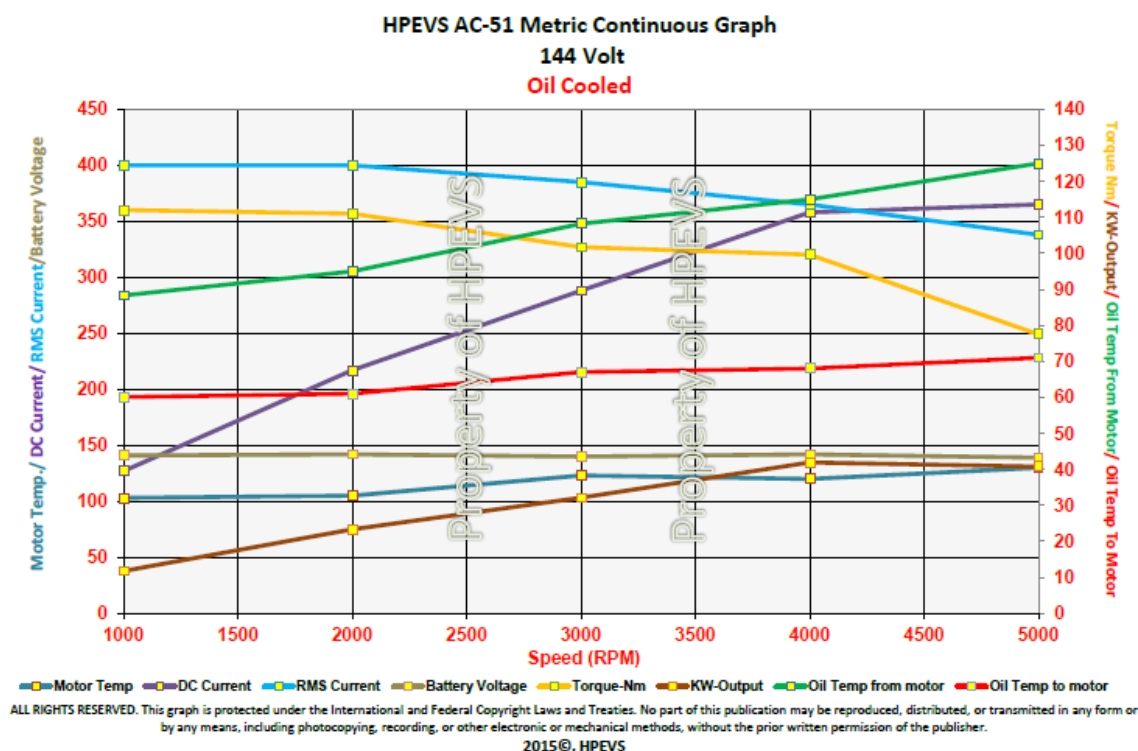
Slika 3.10. Brzine vozila pogonjeno elektromotorom Ansaldo ovisno o vremenu

Elektromotor tvrtke Hpevs model AC 51

Karakteristike motora



Slika 3.11. Snaga i okretni moment elektromotora marke Hpevs model AC51 pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute [9]



Slika 3.12. Snaga i okretni moment elektromotora Hpevs AC51 u trajnom pogonu [10]

Vučna sila

Za sve stupnjeve prijenosa u mjenjaču izračunat će se vučna sila na kotaču u ovisnosti o brzini vožnje (km/h) i prikazati vučnim dijagramom.

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču

$$F_v = \frac{M_p}{r_{din}} = \frac{M_e \cdot i_{uk} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

M_p - pogonski moment na kotaču, Nm

i_{uk} - ukupni prijenosni omjer, -

r_{din} - dinamički radijus kotača, m

M_e - efektivni moment motora, Nm

- Vučna sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa

$$F_{v,i} = \frac{M_e \cdot i_{m,i} \cdot i_{or} \cdot \eta_m}{r_{din}} \quad [N]$$

gdje je:

$F_{v,i}$ - sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa, N

i_{or} - prijenosni omjer osovinog reduktora, -

- Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{din}}{i_{m,i} \cdot i_{or}}$$

gdje je:

v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj brzini vrtnje motora, $\frac{m}{s}$

n - brzina vrtnje motora, s^{-1}

- Vrijednost M_e u ovisnosti od brzini vrtnje očitava se iz dijagrama snage i momenta motora

Tablica 3.11. Očitani moment ovisno o broju okretaja motora

n [o/min]	M_e [Nm]
1000	139,2
2000	139,2
3000	139,2
4000	139,2
5000	124,6
6000	92,6
7000	61,0
8000	43,2

Dobivena vučna sila ovisno o brzini vožnje

Tablica 3.12. Vučna sila ovisno o stupnju prijenosa i brzini vozila

	<i>n</i>	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
1	<i>v</i> ₁	6,4	12,9	19,3	25,7	32,1	38,6	45,0	51,4
	<i>F</i> _{v1}	7346,3	7348,1	7347,5	7348,1	6575,9	4885,0	3220,9	2279,5
2	<i>v</i> ₂	12,5	25,0	37,5	50,0	62,4	74,9	87,4	99,9
	<i>F</i> _{v2}	3782,2	3783,2	3782,9	3783,2	3385,6	2515,0	1658,3	1173,6
3	<i>v</i> ₃	21,4	42,7	64,1	85,4	106,8	128,2	149,5	170,9
	<i>F</i> _{v3}	2211,2	2211,7	2211,5	2211,7	1979,3	1470,3	969,5	686,1

Tablica 3.13. Vučna sila ovisno o stupnju prijenosa

	<i>n</i>	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
1	<i>v</i> ₁	6,4	12,9	19,3	25,7	32,1	38,6	45,0	51,4	57,9
	<i>F</i> _{v1}	6718,7	6718,7	5039,1	3779,4	3023,5	2519,6	2159,6	1889,7	1679,7
2	<i>v</i> ₂	12,5	25,0	37,5	50,0	62,4	74,9	87,4	99,9	112,4
	<i>F</i> _{v2}	3459,1	3459,1	2594,4	1945,8	1556,6	1297,2	1111,9	972,9	864,8
3	<i>v</i> ₃	21,4	42,7	64,1	85,4	106,8	128,2	149,5	170,9	192,3
	<i>F</i> _{v3}	2022,3	2022,3	1516,7	1137,5	910,0	758,4	650,0	568,8	505,6

Vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje

Na slici 3.13. i 3.14. dan je vučni dijagram s ucrtanim krivuljama otpora vožnje na horizontalnoj podlozi te za uspone od 5 %, 10 % i 20 % bez protuvjetra.

- Otpor kotrljanja

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \quad [\text{N}]$$

gdje je:

f_k - faktor otpora kotrljanja, -

m_v - masa vozila, kg

F_k - sila otpora kotrljanja, N

g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- Otpor zraka

$$p_z = \frac{\rho_z \cdot (v+v_0)^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

gdje je:

ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

p_z - dinamički tlak zraka, Pa

v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

v₀ - brzina protuvjetra, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$F_Z = p_z \cdot c_w \cdot A \quad [\text{N}]$$

gdje je:

p_z - dinamički tlak zraka, Pa

c_w - faktor otpora zraka, -

A - čelona površina vozila, m²

F_Z - sila otpora zraka, N

- Otpor uspona

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

gdje je:

F_u - sila otpora uspona, N

g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

α - kut uspona podloge, [°]

- Ukupni otpori vožnje

$$F_R = F_Z + F_k + F_u \quad [\text{N}]$$

gdje je:

F_R - ukupni otpor vožnje, N

F_Z - sila otpora zraka, N

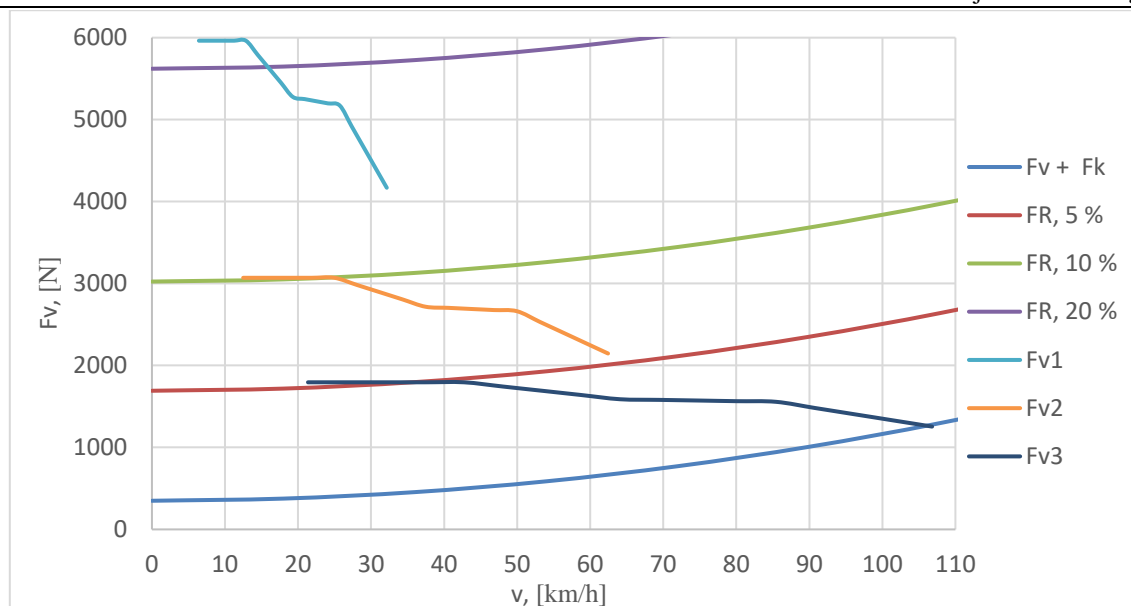
F_k - sila otpora kotrljanja, N

F_u - sila otpora uspona, N

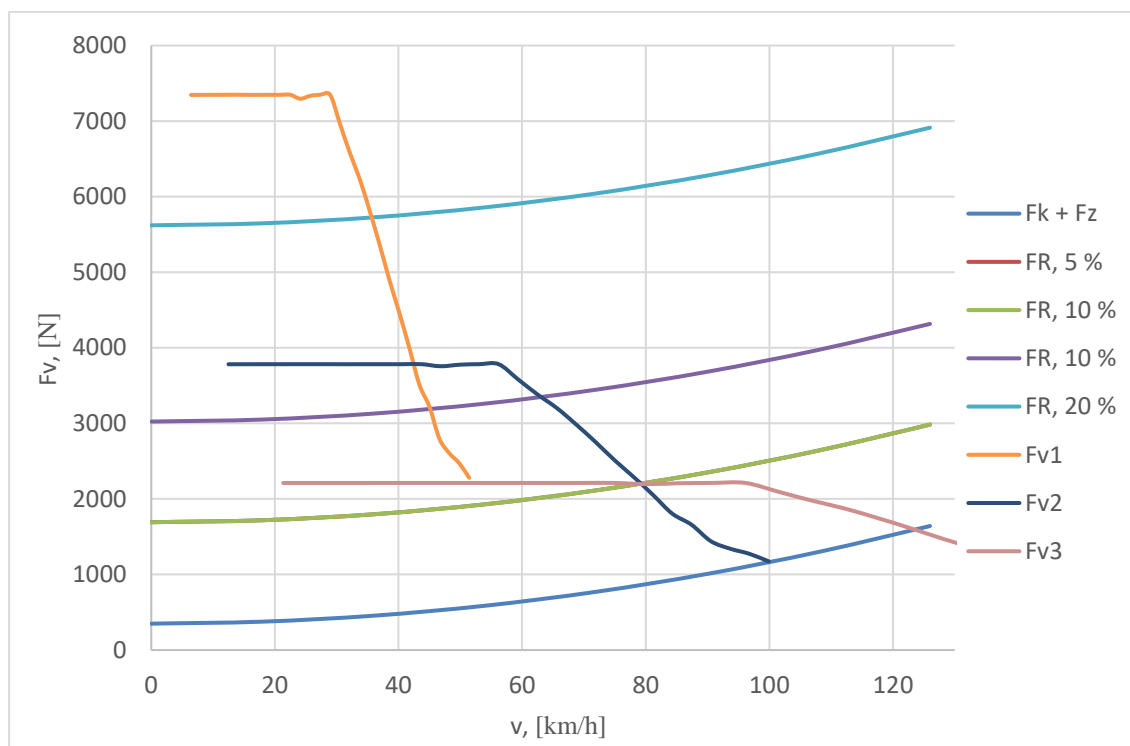
Izračunati otpori vožnje

Tablica 3.14. Otpori vožnje

$v, [\text{m/s}]$	0	5	10	15	20	25	30	35
$v, [\text{km/h}]$	0	18	36	54	72	90	108	126
F_k	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4	349,4
F_z	0,0	26,4	105,5	237,3	421,9	659,2	949,3	1292,1
$F_k + F_z$	349,4	375,8	454,9	586,8	771,3	1008,7	1298,7	1641,5
$F_{u,5\%}$	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3	1342,3
$F_{R,5\%}$	1691,7	1718,1	1797,2	1929,0	2113,6	2350,9	2641,0	2983,8
$F_{u,10\%}$	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6	2674,6
$F_{R,10\%}$	3024,0	3050,4	3129,5	3261,4	3445,9	3683,3	3973,3	4316,1
$F_{u,20\%}$	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5	5271,5
$F_{R,20\%}$	5620,9	5647,3	5726,4	5858,2	6042,8	6280,1	6570,2	6913,0



Slika 3.13. Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje za elektromotor marke Hpevs model AC51 u trajnom pogonu



Slika 3.14. Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje za elektromotor Hpevs pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute

Ubrzanje vozila

Ubrzanje vozila u pojedinom stupnju prijenosa, ovisno o vremenu i prijeđenom putu prilikom ubrzanja vozila na ravnoj cesti bez uspona.

-Ubrzanje vozila

$$a = \frac{P_e \cdot \eta_m - P_R}{v \cdot k_m \cdot m_v} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

gdje je:

- a - ubrzanje vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- P_e - efektivna snaga motora, W
- m_v - masa vozila, kg
- v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- η_m - mehanički stupanj korisnosti, -
- P_R - snaga potrebna za savladavanje otpora vožnje, W

-Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{\text{din}}}{i_{m,i} \cdot i_{\text{or}}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

gdje je:

- v_i - brzina vozila u pojedinom stupnju prijenosa pri određenoj brzini vrtnje motora, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- i_{or} - prijenosni omjer osovine redukcije, -
- $i_{m,i}$ - prijenosni omjer pojedinog stupnja prijenosa, -
- r_{din} - dinamički radijus kotača, m
- n - brzina vrtnje motora, s^{-1}
- π - Ludolfov broj, -

-Snaga za savladavanje otpora kotrljanja

$$P_K = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot v \quad [\text{W}]$$

gdje je:

- g - ubrzanje, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- f_k - faktor otpora kotrljanja, -
- P_K - snaga za savladavanje otpora kotrljanja

-Snaga za savladavanje otpora zraka

$$P_Z = \frac{\rho_z \cdot c_w \cdot A \cdot v}{2} \quad [\text{W}]$$

gdje je:

- P_Z - snaga za savladavanje otpora zraka, W
- c_w - faktor otpora zraka, -
- A - čelona površina vozila, m^2
- v - brzina vozila, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ρ_z - gustoća zraka, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

-Ukupna snaga za savladavanje otpora vožnje

$$P_R = P_Z + P_k \quad [\text{W}]$$

gdje je:

P_R - snaga potrebna za savladavanje ukupnog otpora vožnje, W

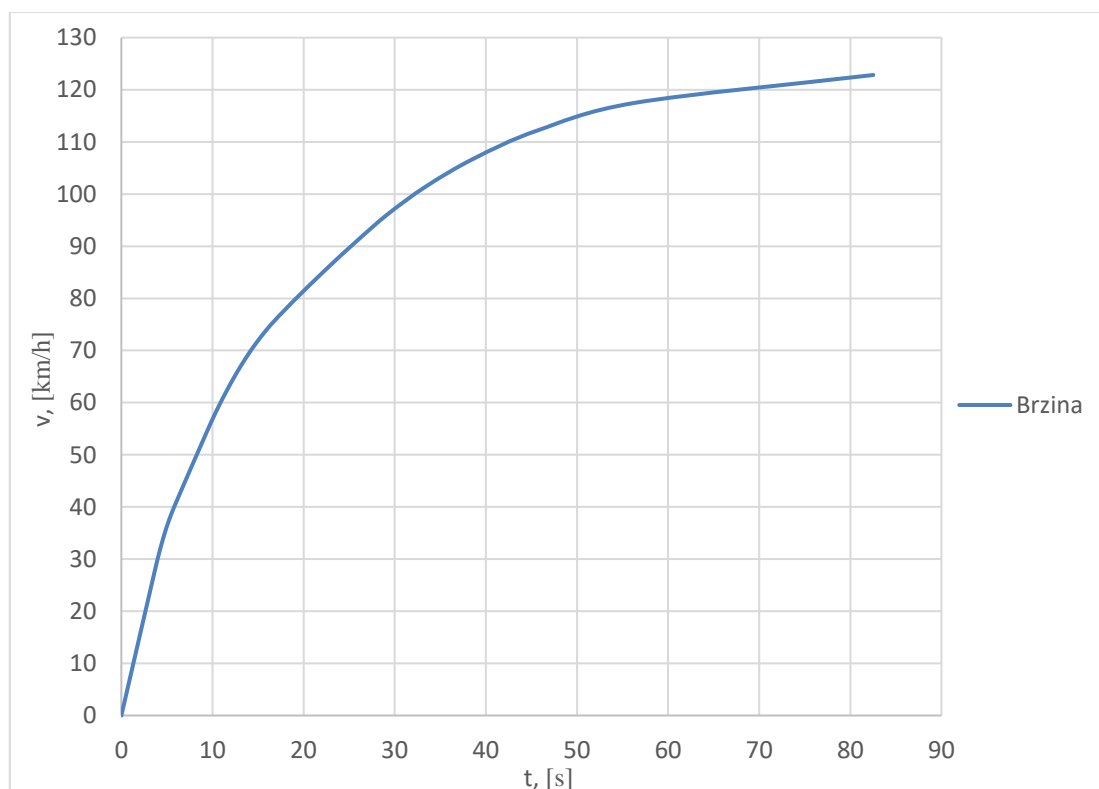
P_Z - snaga potrebna za savladavanje otpora zraka, W

P_k - snaga potrebna za savladavanje otpora kotrljanja, W

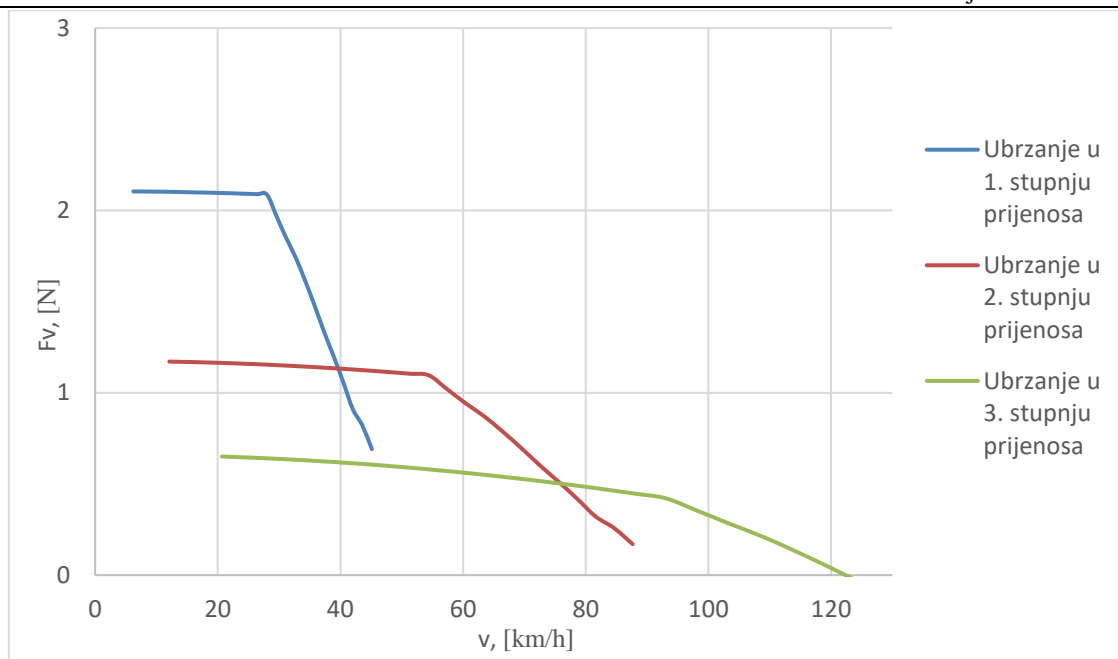
Izračunato ubrzanje

Tablica 3.15. Izračunato ubrzanje ovisno o stupnju prijenosa i brzini vozila za elektromotor marke Hpevs model AC 51

	n	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
	P_e	14,6	29,2	43,7	58,3	65,2	58,2	44,7	36,2
1	v_1	6,2	12,4	18,7	24,9	31,1	37,3	43,6	49,8
	P_R	0,6	1,3	2,0	2,8	3,7	4,8	6,1	7,6
	a_1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,3	0,8	0,5
2	v_2	12,1	24,2	36,3	48,4	60,5	72,5	84,6	96,7
	P_R	1,2	2,7	4,6	7,3	10,9	15,7	21,9	29,8
	a_2	1,2	1,2	1,1	1,1	0,9	0,6	0,3	0,0
3	v_3	20,7	41,4	62,0	82,7	103,4	124,1	144,8	165,5
	P_R	2,2	5,6	11,4	20,8	35,0	55,2	82,6	118,5
	a_3	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3	0,0	-0,4	-0,6



Slika 3.15. Ubrzanje vozila koje je pogonjeno elektromotorom Hpevs AC51 ovisno o vremenu



Slika 3.16. Ubrzanja vozila koje je pogonjeno elektromotorom Hpevs po pojedinim stupnjevima prijenosa

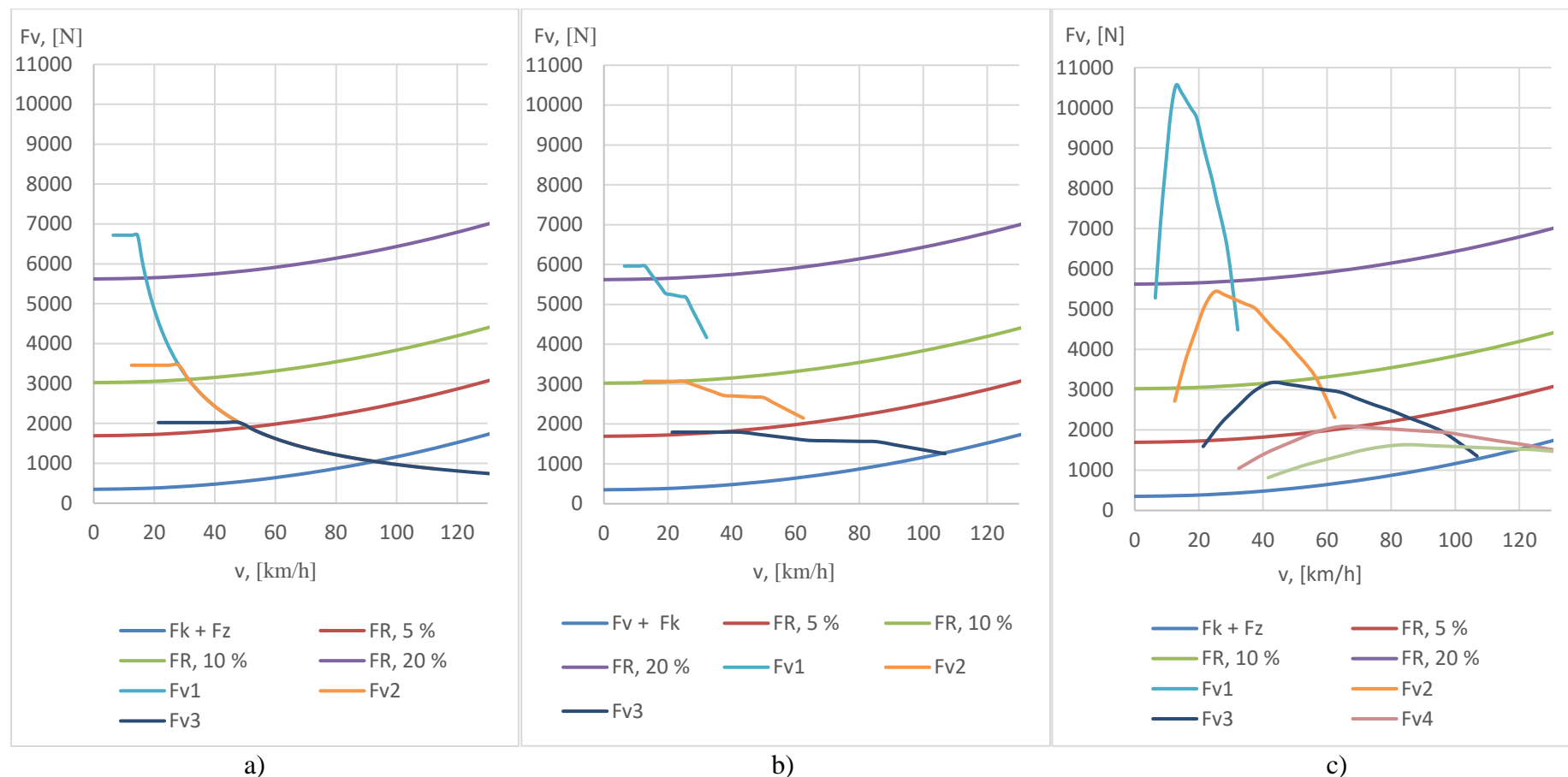
3.4. Odabir elektromotora za potpuno električno vozilo

Iz prethodnog proračuna vučnih dijagrama i ubrzanja vozila za određene motore vidi se da u konačnici oba motora zadovoljavaju prethodno određene kriterije kao što su maksimalna brzina od 90 km/h, te savladavanje uspona od 20 %. Zatim treba naglasiti, da ako se se planira preinačiti vozilo koristeći ove elektromotore, da su ti motor nazivne snage od 30-40 kW te da valja paziti da motor nije predugo u preopterećenju, jer time se zagrijava do nedopušteno visoke stacionarne nadtemperature što može oštetiti motor.

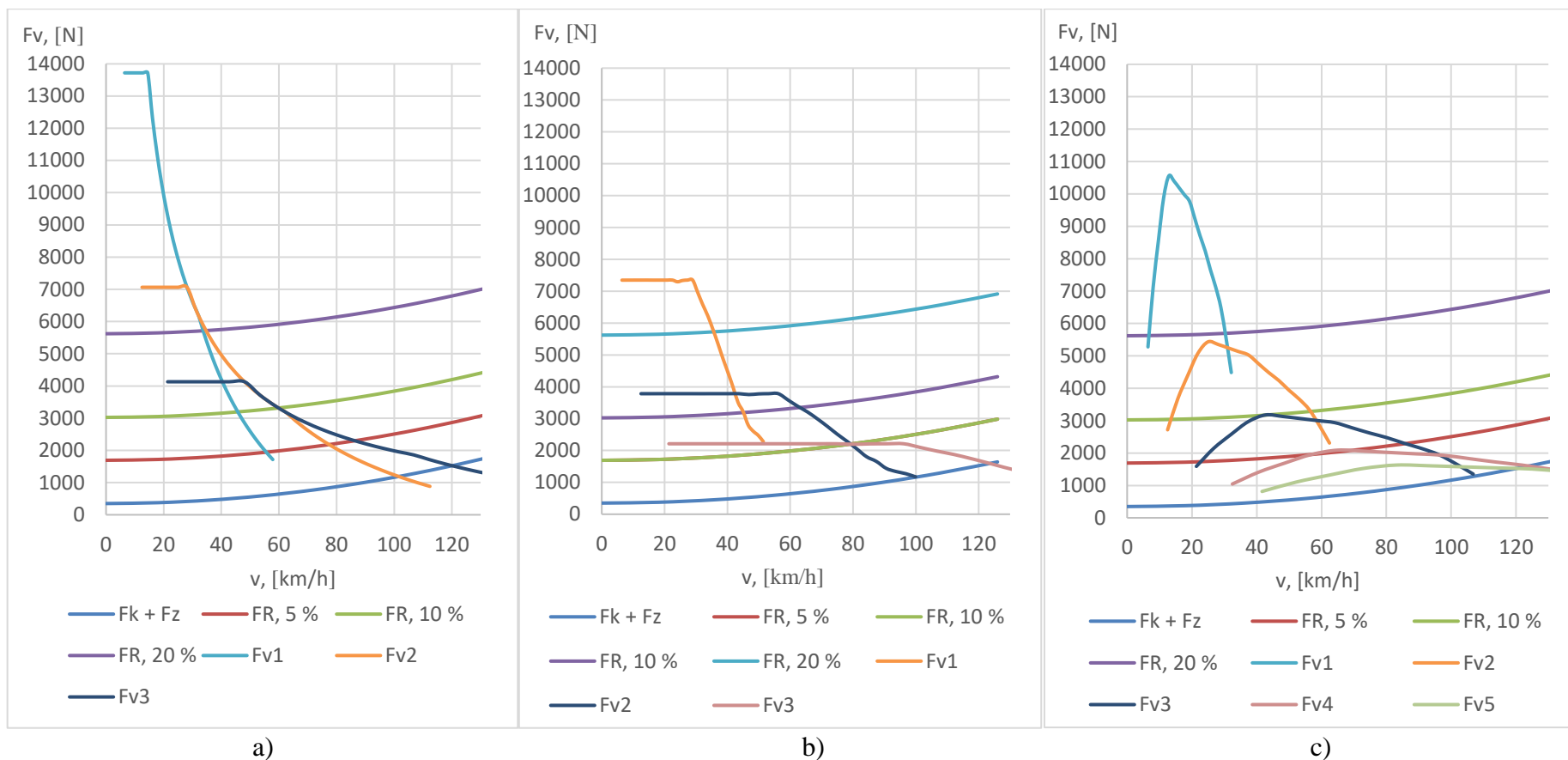
Motori koji zadovoljavaju kriterije su, elektromotor Ansaldo Drive 30-60 kW i elektromotor Hpevs AC 51. Odabir elektromotora izvršiti će se usporedbom ranije izračunatih voznih performansi oba elektromotora s voznim performansama Dieselog motora. Ova usporedba bit će prikazana dijagramima u kojoj će biti prikazani sljedeći podaci: vučni dijagrami pri preopterećenju elektromotora u trajanju najviše 2 minute, vučni dijagrami u trajnom pogonu i dijagrami brzine vozila ovisno o vremenu. Tako će se ujedno i usporediti vozne performanse vozila prije i poslije preinake u električno vozilo. Radi lakše usporedbe važniji podaci bit će prikazani i u tablici.

Tablica 3.16. Usporedba rezultata pojedinih motora

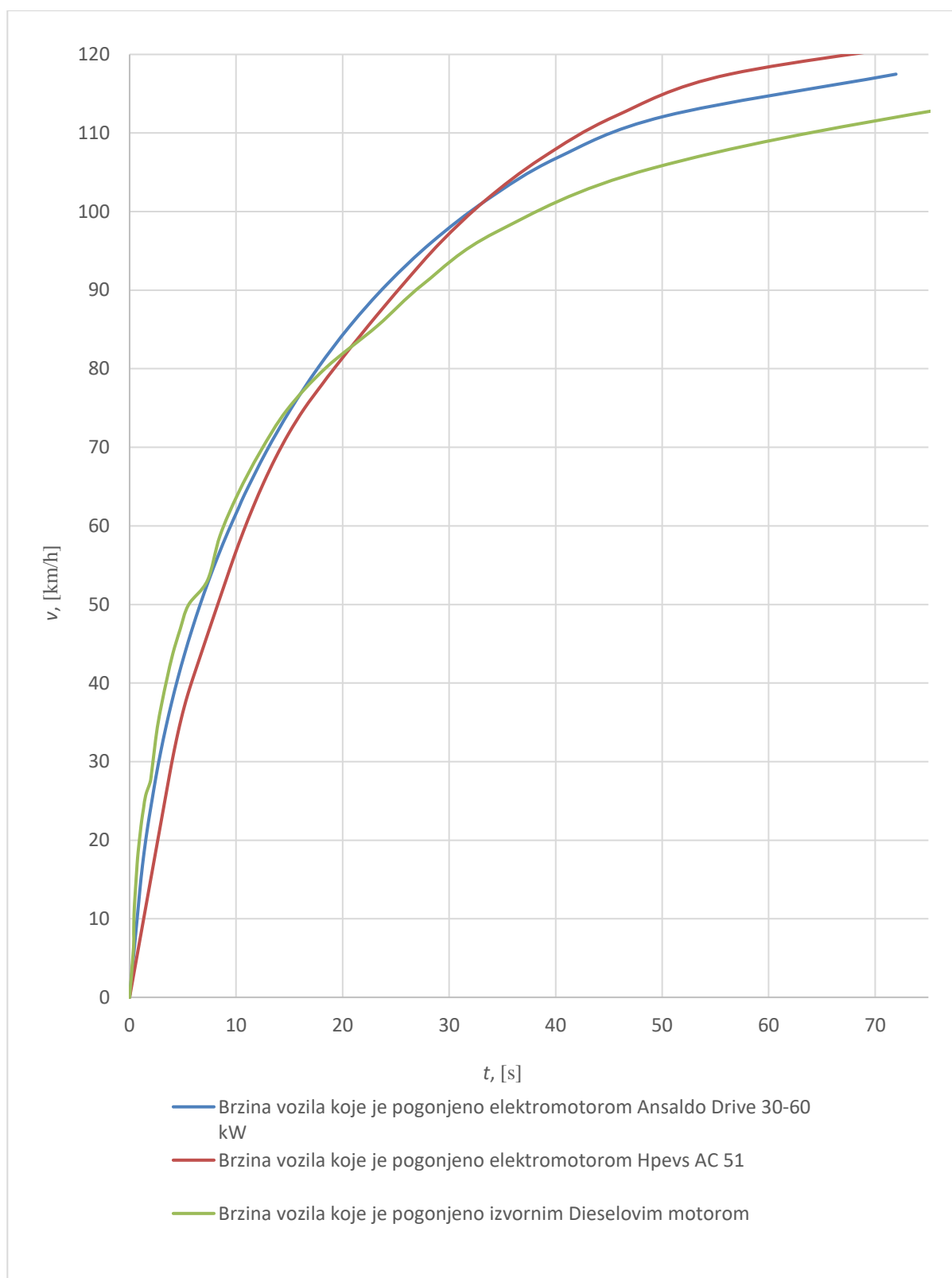
Motor	Savladavanje uspona od 20%	Ubrzanje 0-90 km/h	Maksimalna brzina u trajnom pogonu
Ansaldo Drive 30-60 kW	Da	24 s	96 km/h
Hpevs AC 51	Da	25 s	106 km/h
Dieselov motor OM 611	Da	28 s	125 km/h



Slika 3.17. a) Vučni dijagram elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW u trajnom pogonu, b) Vučni dijagram elektromotora Hpevs AC 51 u trajnom pogonu, c) Vučni dijagram izvornog Dieselog motora OM 611



Slika 3.18. a) Vučni dijagram elektromotora Ansaldo Drive 30-60 kW pri preopterećenju u trajanju od najviše 2 minute, b) Vučni dijagram elektromotora Hpevs AC 51 pri preopterećenju u trajanju najviše 2 minute, c) Vučni dijagram izvornog Dieselog motora OM 611



Slika 3.19. Usporedba ubrzanja vozila s različitim motorima prikazano brzinom vozila ovisnom o vremenu

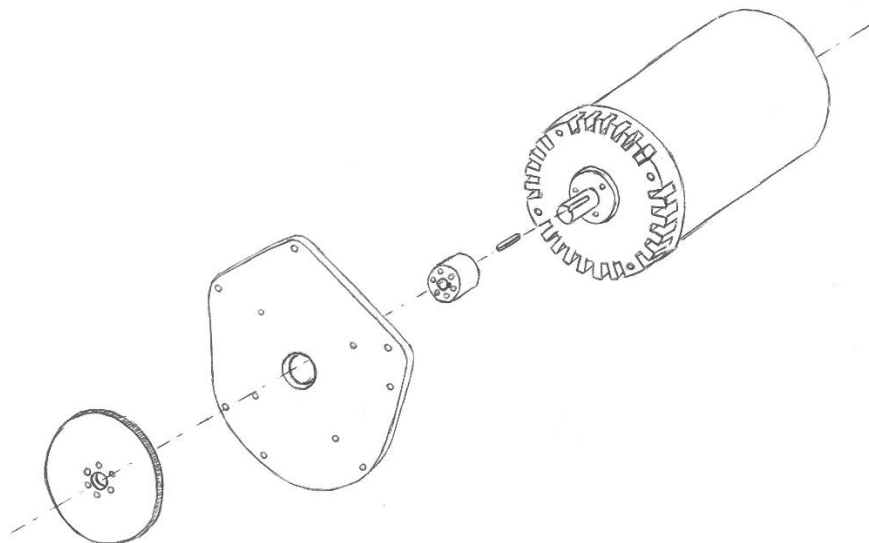
Iz prethodno prikazanih dijagrama i iz tablice 3.16. vidljivo je da elektromotor Ansaldo Drive 30-60 kW postiže bolje ubrzanje iz stanja mirovanja do brzine 90 km/h koje iznosi 24 s, naspram 25 s koliko je potrebno vozilu koje je pogonjeno elektromotorom Hpevs AC 51. Dalje, vidljivo je da vozilo pogonjeno elektromotorom Hpevs AC 51 može trajno održavati veću brzinu vozila, koja iznosi 106 km/h, naspram 96 km/h koje trajno može održavati vozilo pogonjeno elektromotorom Ansaldo Drive 30-60 kW. Valja napomenuti da elektromotor Ansaldo Drive 30-60 kW razvija mnogo veći okretni moment od izvornog Dieselog motora, 260 Nm naspram 200 Nm, što predstavlja problem jer je prijenos poddimenzioniran u odnosu na elektromotor Ansaldo Drive 30-60 kW.

Temeljem ranije navedenih zaključaka i prikazanih dijagrama odabrat će se elektromotor Hpevs AC 51.



Slika 3.20. Odabrani elektromotor Hpevs AC 51 [11]

Način spajanja elektromotora Hpevs AC 51 bit će spajanjem na izvorni zamašnjak pomoću adaptera, a elektromotor će se spojiti na mjenjač pomoću međuploče. Međuploča služi kako bi se spojio izvorni mjenjač i elektromotor Hpevs AC 51, a adapter služi kako bi se spojio elektromotor i zamašnjak. Detalji će biti prikazani slikom 3.21.



Slika 3.21. Način spajanja odabranog elektromotora Hpevs AC 51, redoslijedom s lijeva na desno su prikazani: izvorni zamašnjak, međuploča, adapter, pero i odabrani elektromotor Hpevs AC 51

3.5. Proračun baterija za potpuno električno vozilo

Proračun prosječne energijske potrošnje vozila po prijeđenom kilometru

Proračun prosječne energijske potrošnje vozila po prijeđenom kilometru izračunat će se iz prosječne potrošnje goriva izvornog Diesellovog motora u kombiniranom režimu vožnje. Istraživanjem su pronađeni podaci koji odgovaraju za vozilo marke Mercedes Sprinter 208 CDI. Prosječna potrošnja goriva u kombiniranom režimu vožnje iznosi 10 litara dizelskog goriva [12].

$$G_{l,100 \text{ km,komb}} = 10 \frac{l}{100 \text{ km}}$$

Odnosno, prosječna potrošnja dizelskog goriva po prijeđenoj jedinici puta:

$$G_{l,1 \text{ km,komb}} = 0,10 \frac{l}{\text{km}}$$

Iz tog podatka izračunati će se utrošena energija na pokretanje vozila po prijeđenoj jedinici puta e_{pokr} :

$$e_{\text{pokr}} = G_{l,1 \text{ km,komb}} \cdot \rho_{\text{diz}} \cdot H_{\text{d,diz}} \cdot \eta_{\text{dies}} = 0,10 \cdot 0,832 \cdot 42,5 \cdot 10^6 \cdot 0,30 = 1,061 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{km}}$$

gdje je:

e_{pokr} - utrošena energija za pokretanje vozila po jedinici puta, $\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$

$G_{l,1 \text{ km,komb}}$ - potrošnja dizelskog goriva po prijeđenoj jedinici puta, $\frac{l}{\text{km}}$

ρ_{diz} - gustoća dizelskog goriva, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

η_{dies} - učinkovitost Diesellovog motora. -

$H_{\text{d,diz}}$ - donja ogrjevna vrijednost dizelskog goriva, $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Nakon toga može se izračunat specifičnu potrošnju energije po jedinici puta koju će trošiti elektromotor e_{EV} :

$$e_{\text{EV}} = \frac{e_{\text{pokr}}}{\eta_{\text{el}}} = \frac{1,061 \cdot 10^6}{0,9} = 1,178 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{km}} = 1,178 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{km}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{Wh}}{\text{J}} = 327 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$$

gdje je:

e_{EV} - specifična potrošnja energije električnog vozila po jedinici puta, $\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$

η_{el} - Učinkovitost elektromotora, -

Kako bi odabrali baterije za potpuno električno vozilo prvo je potrebno odabrati tehnologiju baterija. Razmatranjem postojećih električnih vozila na tržištu, vidi se da se koristi više vrsta baterija, baterije na bazi olova, litij-ionske baterije i litij-polimerske baterije. Olovne baterije su baterije s manjom gustoćom energije što ih čini manje prikladnim za ovu namjenu. Temeljem toga, prvo će se proračunati baterije s tehnologijom na bazi olova kako bi se ispitalo može li se ova tehnologija baterija isključiti iz daljnjeg proračuna i odabira baterija.

Proračun baterija za vozilo pogonjeno elektromotorom Hpevs model AC 51

Elektromotor Hpevs AC 51 dolazi uparen s frekvencijskim pretvaračem marke Curtis model 1239E koji je projektiran za taj elektromotor. Date karakteristike ovog elektromotora odnose se na baterije napona 144 V. Prethodno u proračunu je određena prosječna energijska potrošnja vozila po prijeđenom kilometru iz prosječne potrošnje goriva izvornog Dieselog motora u kombiniranom režimu vožnje i ona iznosi $327 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$ te ta će se vrijednost koristiti u daljnjem proračunu.

Prosječna potrošnja energije po prijeđenom kilometru:

$$e_{\text{EV}} = 327 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$$

Zahtijevana autonomnost vozila je 90 km

$$E = e_{\text{EV}} \cdot s = 327 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \cdot 90 \text{ km} = 29,43 \text{ kWh}$$

Gdje je:

E - električna energija, J

e_{EV} - specifična potrošnja energije po prijeđenom kilometru, $\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$

s - put vozila, m

U obzir se mora uvesti i razina pražnjenja baterija. Baterije ne bi trebali isprazniti do kraja budući da im to drastično smanjuje vijek trajanja stoga temeljem toga mora se uvijek ostaviti 25 % kapaciteta baterija. To se naziva razinom pražnjenja baterija engl. *Depth of Discharge* (DoD) te zbog toga množi se energija baterija s koeficijentom DoD koji iznosi 1.25.

$$E \cdot \text{DoD} = 29,43 \text{ kWh} \cdot 1.25 = 36,788 \text{ kWh}$$

gdje je:

DoD – koeficijent razine pražnjenja baterija, -

Nakon što je određena potrebna električna energija koja treba biti sadržana u baterijama može se odrediti i njihov kapacitet. Karakteristike momenta i snage date od strane proizvođača koje su korištene u prethodnom proračunu se odnose na napon iznosa 144 V. Time, kako bi bile osigurane navedene karakteristike motora, napon baterija iznositi će 144 V.

Proračun baterija na bazi olova

Olovne baterije su baterije manje gustoće što dovodi do toga da zauzimaju veći volumen i veće su mase od litij-polimernih i litij-ionskih baterija. Proračunom će se izračunat potreban kapacitet ovih baterija, masa i konfiguracija spajanja baterija.

Mora se uvesti u proračun i Peukert efekt koji objašnjava da ako se većom brzinom prazne baterije, manji kapacitet baterija će ostati na raspolaganju. To se posebno odnosi na baterije na bazi olova te pri brzinama pražnjenja karakterističnima za električna vozila na raspolaganju ostaje samo 55 % kapaciteta baterija dok kod litij-polimernih i litij-ionskih baterija ovaj efekt je manje osjetljiv pošto su one otpornije na brzo pražnjenje te kod njih na raspolaganju ostaje 95 % kapaciteta baterija. Ovaj efekt se uvodi zato što proizvođači često ne nude specifikaciju baterija kod potpunog pražnjenja baterije tijekom vremena od 1 sata, engl. *1 hour rate* (1 hr) koje je karakteristično za električna vozila već samo unutar 20 sati pražnjenja baterije engl. *20 hour rate* (20 hr).

Uvodi se Peukert efekt tako što se množi procijenjenim koeficijentom karakterističnim za olovne baterije koji iznosi 1.8.

$$E \cdot 1,8 = 36,788 \text{ kWh} \cdot 1.8 = 66,218 \text{ kWh}$$

odnosno

$$E = 66,218 \cdot 10^3 \text{ Wh} \cdot 3600 = 2,384 \cdot 10^8 \text{ J}$$

gdje je:

E - električna energija, J

Kapacitet olovnih baterija:

$$Q = \frac{E}{U} = \frac{2,7 \cdot 10^8 \text{ J}}{144 \text{ V}} = 1,655 \cdot 10^6 \text{ C}$$

gdje je:

Q - električni naboj, C

U - napon, V

odnosno

$$Q = 1,655 \cdot 10^6 \text{ C} \cdot \frac{1}{3600} = 459,72 \text{ Ah}$$

Odabir baterija na bazi olova

Razmatranjem postojećih baterija na bazi olova specijaliziranih za uporabu u električnim vozilima na tržištu, odabrane su baterije proizvođača U.S. Battery model US AGM 185. Ovaj model baterije odabran je temeljem toga što ovaj model baterije, je model baterije s najvećom gustoćom energije na tržištu. Napon baterije je 12 V, a kapacitet 234 Ah (20 hr), no ovaj proizvođač nudi i specifikaciju kapaciteta baterije pri potpunom ispražnjenju baterije unutar 1 sata (1 hr) koji iznosi 134 Ah. Time se vidi da je proračun Peukert efekta bio djelomično točan s vrlo malim odstupanjem.



Slika 3.22. Baterija U.S. Battery model US AGM 185 [13]

Količina baterija, konfiguracija spajanja i masa baterija

Konfiguracija spajanja baterija bit će P2S12, odnosno paralelno će biti spojena 2 seta od 12 serijski spojenih baterija jer se tako postiže željeni napon od 144 V i kapacitet od 134 Ah (1 hr) odnosno 234 Ah (20 hr).

Masa jedne baterije iznosi 66.5 kg što za količinu od 24 baterija iznosi 1596 kg. Kako je nosivost vozila 1000 kg, vidljivo je da ova tehnologija baterija nema dovoljnu gustoću energije te nije pogodna za odabrano električno vozilo. Temeljem toga mogu se isključiti baterije ove tehnologije.

3.6. Proračun litij-ionskih i litij-polimernih baterija

Litij-polimerne i litij-ionske baterije kemijske formule LiFePO_4 i LiFeMnPO_4 su veće gustoće energije što dovodi do toga da zauzimaju manji volumen i manje su mase od olovnih baterija, no veće su cijene. Proračunom će se izračunati potreban kapacitet ovih baterija, masu i konfiguraciju spajanja baterija.

Uvodi se Peukert efekt tako što se množi procijenjenim koeficijentom karakterističnim za litij-polimerne baterije koji iznosi 1.05.

$$E \cdot 1,05 = 36,788 \text{ kWh} \cdot 1,05 = 38,63 \text{ kWh}$$

odnosno

$$E = 38,63 \cdot 10^3 \text{ Wh} \cdot 3600 = 1,39 \cdot 10^8 \text{ J}$$

gdje je:

E - električna energija, J

Električni naboj baterija:

$$Q = \frac{E}{U} = \frac{1,39 \cdot 10^8 \text{ J}}{144 \text{ V}} = 9,653 \cdot 10^5 \text{ C}$$

gdje je:

Q - električni naboj, C
 U - napon, V

odnosno




$$Q = 1,655 \cdot 10^6 \text{ C} \cdot \frac{1}{3600} = 268,14 \text{ Ah}$$

Odabir baterija

U tablici 3.17. su količina i konfiguracija baterija proračunate tako da je napon seta baterija 144 V, a minimalni kapacitet seta baterija 260 Ah, što osigurava autonomiju vozila Mercedes-Benz Sprinter pogonjen elektromotorom Hpevs AC 51 od 90 km pri punom opterećenju vozila. Setovi baterija su dimenzionirani na način da je odabran prvi veći mogući kapacitet seta baterija te prema tome su prikazane vrijednosti autonomije, mase, cijene.

Pri odabiru valja paziti i na nosivost vozila stoga u tablici bit će dati i podaci koji se odnose na to.

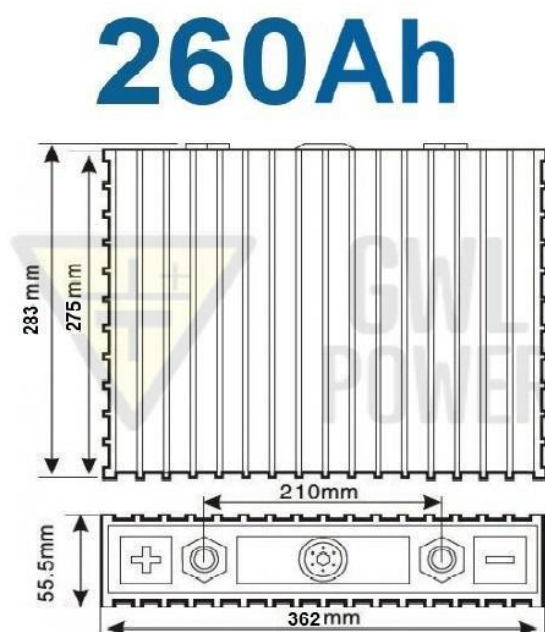
Tablica 3.17. Usporedba baterija za potpuno električno vozilo

Proizvođač i model baterija	Specifikacije članka				Konfiguracija, masa, električni napon i naboj seta baterija				Preostala nosivost vozila	Autonomija	Cijena
	Kemijska formula	Napon članka	Masa	Električni naboj	Konfiguracija seta	Električni napon seta	Električni naboj seta	Masa seta baterija			
1.  GWL Power, 260 Ah	LiFeYPO4	3,2 V	8,7 kg	260 Ah	P1S45	144 V	260 Ah	391,5 kg	658,5 kg	87 km	87 282,36 kn
2.  GBS, 90 Ah	LiFeMnPO4	3,2 V	2,8 kg	90 Ah	P3S45	144 V	270 Ah	378 kg	672 kg	91 km	99 519,30 kn
3.  Voltronix, 260 Ah	LiFePO4	3,2 V	9 kg	260 Ah	P1S45	144 V	260 Ah	405 kg	645 kg	87 km	125 398,00 kn

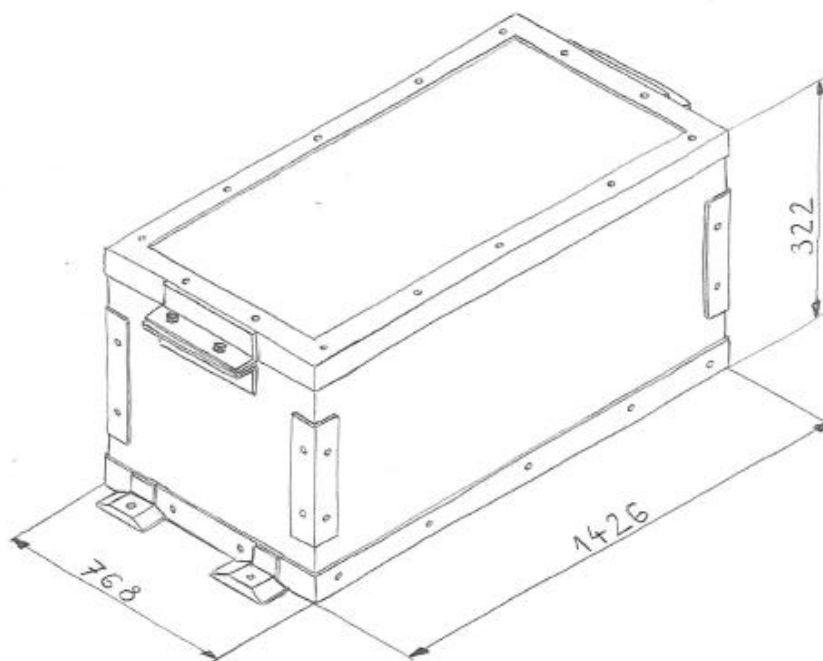
Odabir između baterija prikazanih u tablici 3.17. je kompromis između cijene, autonomije i nosivosti vozila, no kako je osjetna razlika vidljiva samo u cijeni ona će ujedno biti i jedini prioritet. Temeljem toga odabrat će se baterije proizvođača GWL Power, model 260 Ah. Cijena ovih baterija je 87 282,36 kn, autonomija vozila je 87 km, a nosivost vozila 658,5 kg.

Dimenzije kućišta baterija i pozicija kućišta baterija

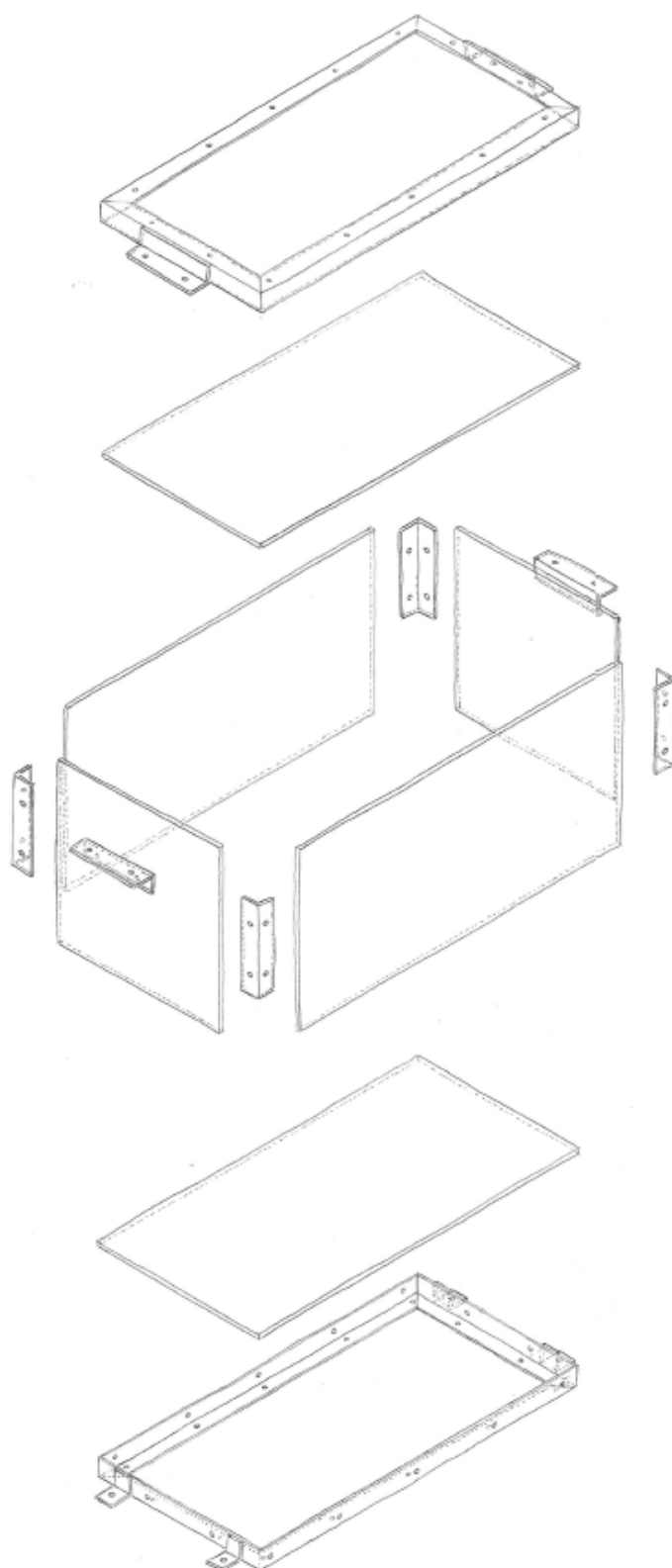
Kućište za baterije će se dimenzionirati prema prethodno odabranim baterijama marke GWL Power, model 260 Ah. Proračunom je ustanovljeno da je potrebna količina od 45 baterija GWL Power 260 Ah, te potrebno ih je spojiti u serijski spoj. Dimenzije jednog članka baterija prikazane su slikom 3.23. Kako je vozilo Mercedes-Benz teretno vozilo, baterije će bit smještene u teretni prostor. Zbog mase baterija, koja iznosi 391,5 kg, prikladno bi bilo da mjesto ugradnje baterija, odnosno kućišta baterija, bude što niže u tovarnom prostoru, te što bliže vozačevoj kabini vozila jer smještajem baterija što bliže prednjoj osovini postiže se da je masa baterija više raspoređena na prednju osovину, osovину koja je prilikom uklanjanja izvornog Dieselog motora i ugradnjom lakšeg elektromotora rasterećena. Slikom 3.24. prikazat će se dimenzije i izgled kućišta baterija, a slikom 3.25. prikazat će se pregled dijelova kućišta i način izrade. Slikom 3.26. prikazat će se odabrana pozicija smještaja baterija, tj. kućišta baterija.



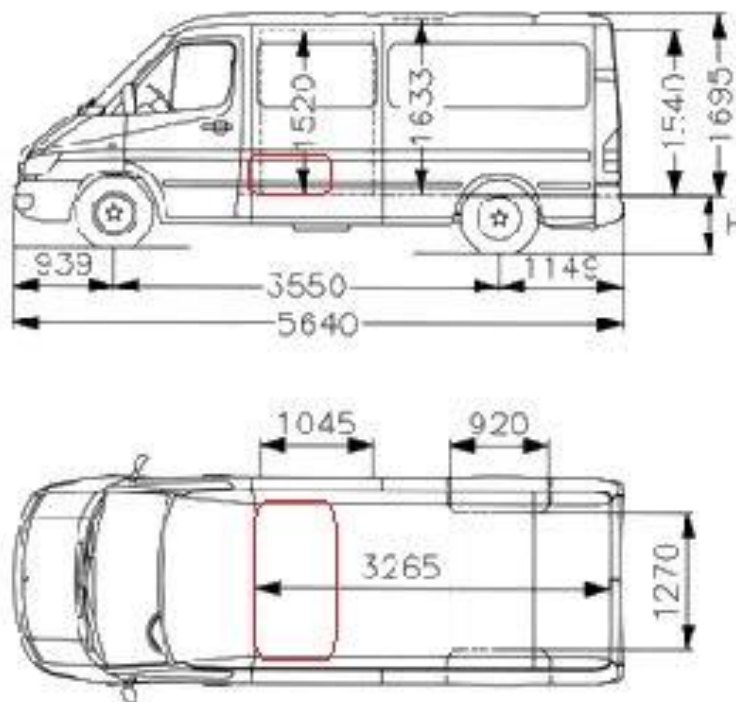
Slika 3.23. Dimenzije članka odabranih baterija GWL Power 260 Ah [14]



Slika 3.24. Dimenzije i izgled kućišta baterija



Slika 3.25. Pregled dijelova kućišta baterija



Slika 3.26. Smještaj kućišta baterija označen je crvenom bojom na dispozicijskom crtežu vozila

4. Financijska analiza preinake u potpuno električno vozilo

U financijskoj analizi preinake vozila izračunati će se cijena preinake odabranog vozila u potpuno električno vozilo. Za pogon potpuno električnog vozila prethodno je odabran elektromotor marke Hpevs model AC 51 i baterije marke GWL Power, model 260 Ah [15]. Budući da u okviru završnog rada nisu prikupljene ponude tvrtki za pojedine dijelove i radove montaže i demontaže neke od cijena su pretpostavljene.

Tablica 4.1. Troškovnik preinake vozila u potpuno električno vozilo

Troškovnik radova					
Rb.	Opis stavke	J.M.	Količina	Jedinična cijena (s pdv-om)	Ukupna cijena
1	2	3	4	5	6= 4·5
1.	Izrada okvira kućišta baterija dimenzije 210x40x30 mm iz čeličnih L profila. Izrada stranica kućišta baterija iz šperploče. Sklapanje kućišta baterija.				
	Potreban materijal:				
	Čelični L profil 50x50x3 mm	m	12	59,43 kn	713,16 kn
	Šperploča 6 mm	m ²	4	77,25 kn	309,00 kn
	Potrebno radnih sati:				
	Pomoćni radnik	h	10	200,00 kn	2 000,00 kn
2.	Slaganje baterija u kućište baterija i spajanje u konfiguraciju P1S45.				
	Potreban materijal:				
	Baterije GWL Power 260 Ah	kom	45	1 939,61 kn	87 282,36 kn
	Strujni kabelevi	m	15	60,00 kn	900,00 kn
	Potrebno radnih sati:				
	Električar	h	4	220,00 kn	880,00 kn
	Pomoćni radnik	h	4	180,00 kn	720,00 kn
3.	Nabava elektromotora marke Hpevs AC 51. Projektiranje i izrada međuploče i adaptera za spajanje motora. Projektiranje i izrada okvirne konstrukcije i nosača motora. Spajanje pogona vozila.				
	Potreban materijal:				
	Elektromotor Hpevs AC 51	kom	1	30 550,00 kn	30 550,00 kn
	Čelični profili	m	8	120,00 kn	960,00 kn
	Potrebno radnih sati:				
	Dipl. Ing. Mech.	h	15	250,00 kn	3 750,00 kn
	Autoelektričar	h	6	220,00 kn	1 320,00 kn
	Automehaničar	h	20	210,00 kn	4 200,00 kn
	Zavarivač	h	4	180,00 kn	720,00 kn
UKUPNO: 134 304,52 kn					

Troškovnikom iz tablice 4.1. prikazana je okvirna cijena preinake vozila Mercedes-Benz Sprinter 208 CDI u potpuno električno vozilo iz koje se vidi da je okvirna cijena preinake 135 000,00 kn.

5. Zaključak

U ovom završnom radu napravljen je proračun i financijska pretpostavka preinake vozila marke Mercedes-Benz model Sprinter 208 CDI u potpuno električno vozilo. Proračunati novi pogonski sklop vozila zadovoljava postavljene kriterije voznih performansa vozila, autonomije i nosivosti vozila. Odabrani pogonski sklop vozila osigurava podjednake vozne performanse vozila kao s izvornim Dieslovim motorom s kakvim je ovo vozilo bilo izvorno pogonjeno. Izvorna nosivost vozila narušena je masom sklopa baterija, koji se nalazi u tovarnom prostoru vozila, no zadovoljava postavljeni kriterij nosivosti vozila koji je kreiran prema potrebama dnevnih aktivnosti tvrtke ČAKOM. Autonomija vozila ograničena je odabranim baterijskim sklopom te iznosi 89 km što je dovoljno za potrebe svakodnevnih aktivnosti tvrtke ČAKOM. Financijskom analizom proračunata cijena ove preinake vozila je 135 000 kn, što približno odgovara polovici cijene novog vozila ove kategorije s klasičnim pogonskim sklopom. No valja naglasiti da su operativni troškovi korištenja električnog vozila niži, te temeljem toga dužim korištenjem ovakvog vozila će se djelomično amortizirati visok iznos cijene preinake vozila. Prednost električnog pogona vozila je niža cijena operativnih troškova korištenja vozila, značajno smanjenje onečišćenja zraka kao i veća udobnost vožnje, naročito zbog manje buke koju proizvodi elektromotor. Unatoč prednostima, električna vozila imaju ograničenja, a to su najviše cijena, autonomija i nerazvijena infrastruktura za punjenje baterija vozila. Elektromotori i potrebne kontrolne jedinice predstavljaju prednost naspram klasičnih motora s unutarnjim izgaranjem kako cijenom tako i specifičnom snagom, jednostavnijom izvedbom i boljim vanjskim karakteristikama motora. Ograničenja električnih vozila većinom se svode na baterijski sklop zbog visoke cijene, manje gustoće energije u odnosu na fosilna goriva kakvim su pogonjeni motori s unutarnjim izgaranjem time i težinom baterijskog sklopa, te temeljem toga može se zaključiti da daljnji napredak koji će potaknuti veću uporabu električnih vozila jest napredak tehnologije baterija.

6. Literatura

[1] TuttoTrasporti

<http://www.tuttotrasporti.it/listini-nuovo/archivioLeggeri.3275-TF01-52708-2004-1.html>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[2] Podloge za predavanja iz predmeta Motorna vozila

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, mr. sc. Krunoslav Ormuž, dr. sc. Goran Šagi, Motorna vozila, FSB, Katedra za motore i vozila Zagreb, 2014.

[3] EV WEST

http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=172

Datum pristupa: 20.9.2017.

[4] e-transportation

http://www.e-transportation.eu/catalog/product.php?id_product=80

Datum pristupa: 19.9.2017.

[5] Micro-vett

<http://micro-vett.it/portfolio/ducato-micro-vett/>

Datum pristupa: 17.9.2017.

[6] Karabag

<https://www.karabag.de/ fiat-fiorino/fiorino-kombi/>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[7] e-transportation

<http://www.e-transportation.eu/catalog/img/p/80-520-thickbox.jpg>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[8] e-transportation

<http://www.e-transportation.eu/catalog/img/p/80-519-thickbox.jpg>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[9] Hpevs

<http://www.hpevs.com/hpevs-ac-electric-motors-power-graphs-ac-51.htm>

Datum pristupa: 18.9.2017.

[10] Hpevs

<http://www.hpevs.com/hpevs-ac-electric-motors-power-graphs-ac-51.htm>

Datum pristupa: 18.9.2017.

[11] EV WEST

http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?manufacturers_id=7&products_id=172

Datum pristupa: 20.9.2017.

[12] Kfz anzeiger

<http://kfz-anzeiger.com/images/stories/testberichte/mercedes/sprinter208/Sprinter208cdi.htm>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[13] U.S. Battery

<http://usbattery.com/products/us-agm-batteries/us-agm-185/>

Datum pristupa: 20.9.2017.

[14] GWL Power

https://www.ev-power.eu/out/pictures/z1/lfp260aha_z1.jpg

Datum pristupa: 21.9.2017.

[15] GWL Power

<https://www.ev-power.eu/en/By-Brand-Manufacturer/GWL-Power/WB-LYP260AHA-LiFeYPO4-3-2V-260Ah.html?listtype=search&searchparam=gwl>